Travaux pratiques





Travaux pratiques pour lycées et collèges

Physique
Chimie
Biologie

Le pesage

Pour appréhender les lois de la nature

METTLER TOLEDO

Table des matières

Des expériences claires effectuées en classe et l'expérimentation autonome en travaux pratiques, voilà de quoi donner vie aux considérations théoriques sur les lois scientifiques. Ce qui est perçu par l'observation est non seulement plus facile à traduire en formules abstraites, mais se grave également avec plus de force dans la mémoire de l'élève.

A l'aide d'une balance électronique, vous pouvez démontrer de manière frappante à vos élèves comment se manifestent les lois, formules et phénomènes de la physique, de la chimie et de la biologie.

Nous avons surtout veillé à ce que les différentes expériences puissent être montées à peu de frais et avec des moyens simples. Chaque expérience individuelle a, de plus, été testée plusieurs fols. Lorsque vous réaliserez une expérience, vous pourrez vous concentrer entièrement sur l'enseignement, de par sa simplicité d'emploi, la balance électronique ne demandera qu'une attention occasionnelle de votre part.
Bien entendu, nous vous demandons cependant de respecter les consignes générales de sécurité.

Il ne nous reste qu'à vous souhaiter une bonne réussite et beaucoup de satisfactions.

Mettler-Toledo AG
CH-8606 Greifensee

Consignes générales de sécurité

Cette brochure présente des exemples d'expériences pour l'enseignement. Le matériel, les substances utilisés, tout comme le déroulement des expériences ne sont indiqués qu'à titre d'exemple. La responsabilité des expériences et de leur déroulement incombe exclusivement à la personne qui les réalise. METTLER TOLEDO dégage toute responsabilité.

Les expériences doivent être réalisées exclusivement par des personnes qualifiées ou bien sous la surveillance de personnes compétentes.

Il convient de respecter la notice d'utilisation de tous les appareils utilisés (balances de précision, becs Bunsen, ventilateurs, etc.).

Différentes matières citées dans les expériences sont dangereuses, toxiques ou explosives. En outre, leur utilisation peut être interdite, restreinte par la loi ou par le règlement intérieur de l'établissement d'enseignement, ou être soumise au respect de règles strictes, en particulier en matière de sécurité. Seul l'utilisateur est responsable de la mise en oeuvre de toutes les substances et du respect des règles en vigueur. Toutes les règles et consignes de sécurité doivent être respectées.

La métrologie ou l'art de la mesure

Le matériel de mesure de précision n'est pas seulement la base de la recherche scientifique, il joue aussi un rôle très important dans notre vie en général, au quotidien. Quelqu'un qui peut mesurer avec exactitude une longueur, le temps ou encore un poids est digne de confiance. Ainsi ceux qui sont autorisés à déterminer poids et masse détiennent la puissance.

Alors que la mesure du temps ou d'une dimension pouvait reposer sur une unité basée sur la biologie ou la physique, le choix des unités de poids était aléatoire. C'est ainsi que les pays, les principautés et les villes avaient tous leurs propres unités de poids.

Ce n'est pas avant la Convention du Mètre en 1875, signée maintenant par plus de 50 pays, qu'une normalisation du système des poids et masse devint possible.



Notre unité de base familière d'un kilogramme est l'équivalent de la masse du kilogramme étalon international. Ce « kilogramme étalon » est entreposé dans le Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres près de Paris dans des conditions environnementales très strictes. C'est un cylindre de 39 mm de hauteur et de 39 mm de diamètre constitué d'un alliage contenant 90% de platine et de 10% d'iridium, garantissant une masse constante. Des références nationales sont régulièrement comparées à cet étalon tous les 25 ans, fréquence faible, choisie pour limiter les manipulations pouvant occasionner une variation de sa masse.

L'histoire de la balance remonte loin dans le passé. Les restes des plus vieilles balances connues furent découverts dans une tombe préhistorique en Egypte : ils furent datés aux alentours de 5000 ans avant notre ère. On connaît des pierres de poids identique depuis plus longtemps encore. On peut donc supposer que l'homme pèse depuis plus de 7000 ans.

Un peu de culture…

Le type de balance le plus familier que nous connaissions est une balance (encore appelée « trébuchet ») dont les deux bras du fléau sont égaux. La masse d'un échantillon est comparée à celles de masses standard.

On peut citer encore d'autres types de balances telles que le pont bascule pour les véhicules, la balance postale ou encore la balance à ressort dans laquelle la force du poids, fonction de la gravité, est visualisée sur une échelle linéaire

La balance est familière pour l'homme non seulement parce qu'elle constitue un des instruments de mesure les plus courants et les plus diversifiés, mais aussi parce que depuis des temps immémoriaux elle est l'emblème de l'égalité et de la justice. La balance occupe ainsi une place aussi importante que l'épée de jugement de la Déesse Justitia, symbole d'un jugement équilibré.





La pesée de l'âme chez les Egyptiens et les Grecs anciens, est un autre usage symbolique intéressant de la balance. On retrouve de nombreuses représentations de ce rituel, utilisé comme moyen de jugement au tribunal de la mort, dans les sarcophages d'anciennes momies égyptiennes ou sur les papyrus accompagnant le défunt. En fonction du résultat, l'âme, représentée sur la balance par un petit récipient, avec, se tenant à côté, la personne devant être jugée, passait soit avec le dieu des ténèbres pour être dévorée, soit avec le dieu de la lumière pour gagner un lieu de félicité. L'âme est pesée contre la vérité représentée sous la forme d'une plume (hiéroglyphe symbolisant la vérité, la justice) déposée sur l'autre plateau de la balance.

Une représentation similaire, venant de l'adoration chrétienne des saints, est celle de Saint Michel, juste avocat du jugement dernier.



Les expressions familières

Que quelque chose de léger ou même d'immatériel puisse avoir un poids important, est montré à l'évidence quand quelqu'un réussit d'un simple mot à prendre une décision pesante, mais nous devons à un ami fidèle, pour qui la balance penche en notre faveur, le fait de ne pas perdre le sens de l'équilibre : il peut alors nous donner le conseil suivant « pèse les choses pesantes en premier ». Maintenant, alors que les gens qui pèsent chacun de leurs mots puissent être intelligents, ils doivent être regardés comme des contemporains pédants souffrant d'un mal existentiel

Détermination de la densité des corps solides par la mesure du volume et du poids

But pédagogique Cette expérience illustre les notions de masse et de densité; elle sert également d'introduction à la technique de pesée.

Exercice Calculer le volume de corps à formes régulières, à partir de leurs dimensions. Déterminer la masse par pesée. Calculer la densité à partir du volume et de la masse.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Corps de forme parallélépipédique, sphérique, conique, cylindrique
Instruments de mesure de la longueur, pieds à coulisse, palmers (micromètres à vis)

Mode opératoire Chaque élève reçoit un corps, détermine ses dimensions et calcule son volume. Puis il pèse l'objet (sous la surveillance du professeur) et exploite finalement les résultats.

Exploitation La densité est le quotient de la masse et du volume

$\rho = \frac{m}{V}$ unités : g/cm^3, kg/m^3

Les différents objets peuvent être étudiés successivement par tous les élèves (éventuellement par groupes de 2 élèves).

Conclusion L'imprécision relative du résultat devrait être estimée par un calcul d'erreur:
- erreurs de calibrage négligeables
- précision de la forme géométrique?
- erreur relative sur les mesures de longueur?
- erreur relative de la pesée?

Remarques La balance affiche la masse exacte de l'objet seulement lorsque la densité de cette objet est de 8000 kg/m^3
- Pour une détermination sur des corps de faible densité, comme le polystyrène expansé, il faut effectuer une correction de la poussée d'Archimède sous peine d'un résultat erroné.
- Lorsque la densité de fils fins ou de fines feuilles (fil de cuivre, feuille d'aluminium) est connue, leur épaisseur peut être déterminée par pesée.
- On peut calculer π à l'aide de corps cylindriques ou sphériques de densité connue.

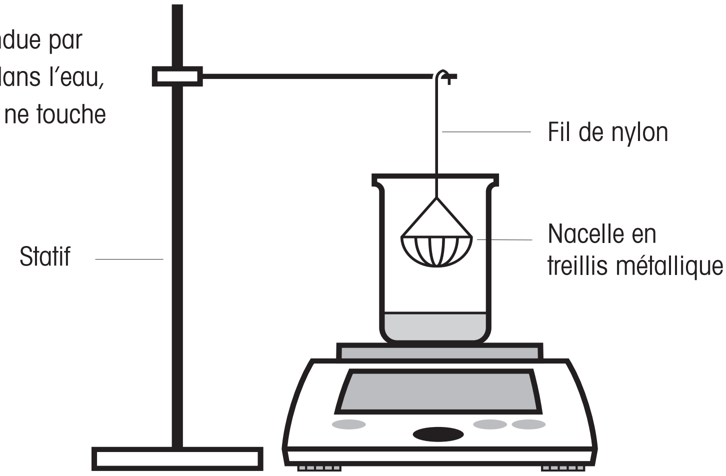
Densité des corps solides (méthode de la poussée d'Archimède)

But pédagogique Cette expérience illustre les notions de masse, de poussée d'Archimède et de densité.

Exercice Déterminer le volume de corps solides de différentes formes à partir de la poussée d'Archimède et déterminer leur masse par pesée. En déduire, par le calcul, la densité moyenne du corps.

Matériel
Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Bécher rempli d'eau
Statif avec noix et tige transversale
Fil de nylon
Petite nacelle en treillis métallique à grosses mailles
Paire de pincettes
Corps de forme quelconque (p.ex. vis, clé, pièce de monnaie)

Montage expérimental La nacelle vide, suspendue par le fil de nylon, plonge dans l'eau, de telle manière qu'elle ne touche pas la paroi du bécher.



Mode opératoire Tarer la balance. Poser le corps sur le plateau de la balance à côté du bécher et déterminer sa masse *m*. Placer à présent le corps dans la nacelle à l'aide des pincettes. Il ne faut pas perdre d'eau par éclaboussures ou par des gouttelettes retenues par les pincettes. Veiller absolument à chasser les bulles d'air accrochées à la nacelle et à son contenu!
Le corps à peser est soumis à une poussée ascendante F_A et repousse l'eau vers le bas avec une force opposée *F* identique. La balance indique $\tilde{m}$ et nous avons la relation $F_A = \tilde{m} \cdot g$.

Exploitation Selon le principe d'Archimède $F_A = V_{solide} \cdot \rho_{liquide} \cdot g = \tilde{m}g$

$$V_{solide} = \frac{\tilde{m}}{\rho_{liquide}}$$

et la densité moyenne

$$\rho_{solide} = \frac{m}{V_{solide}} = \frac{\tilde{m}}{\rho_{liquide}} = \rho_{liquide} \cdot \frac{m}{\tilde{m}}$$

Exemple : écrou de roue d'automobile
température de l'eau 20 °C
masse de l'écrou $m = 52.74$ g
poussée ascendante $\tilde{m} = 6.74$ g

$$\rho = 1.00\ \text{g/cm}^3 \cdot \frac{52.74\ \text{g}}{6.74\ \text{g}} = 7.83\ \text{g/cm}^3$$

Conclusion A 20 °C, la densité de l'eau est inférieure de 0,2% à 1 g/cm^3. Même sans tenir compte de la variation de la densité en fonction de la température, il est possible de déterminer le volume et la densité moyenne de petites pièces de monnaie avec une précision supérieure à 1%.
Pour les pièces d'or et d'argent, on peut déterminer la teneur en métal fin, quand on connait la densité (moyenne) de l'additif d'alliage. Nous avons:

	masse	volume	(densité moyenne)
pièce de monnaie	m	V	ρ
or, argent	m_x	V_x	ρ_x
reste	m_R		ρ_R

$$m = m_x + m_R$$
$$V \cdot \rho = V_x \cdot \rho_x + (V - V_x) \cdot \rho_R$$

$$\frac{V_x}{V} = \frac{\rho - \rho_R}{\rho_x - \rho_R} \quad \text{or} \quad m_x / m = \ldots$$

Variation de la densité de l'eau en fonction de la température

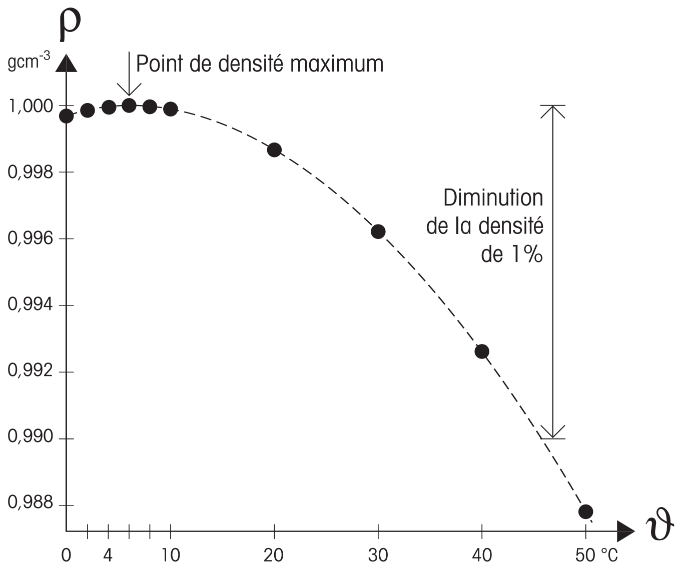
But pédagogique La densité de l'eau change avec la température. L'eau atteint sa densité maximale à 4 °C (anomalie de l'eau).

Exercice Déterminer la densité de l'eau entre 0 et 50 °C à l'aide d'un pycnomètre et d'une balance. Les résultats de mesure doivent également être représentés graphiquement.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
pycnomètre 50 ou 100 mL, si possible en quartz et avec thermomètre à rodage
Bécher de 1000 mL
Eventuellement thermomètre allant de 0 à 50 °C gradué au $^{1}/_{10}$ ou $^{1}/_{5}$ de degré
Plaque chauffante
Plaque de polystyrène expansé isolante
Essuie-main
Glaçons

Mode opératoire Une isolation thermique est obtenue enposant une plaque de polystyrène isolante sur le plateau de la balance. S'assurer que la plaque de polystyrène ne recouvre pas le plateau de la balance pour des raisons d'interférences électrostatiques. Tarer la balance avec le pycnomètre vide. Pour remplir le pycnomètre, le placer dans le bécher rempli d'eau glacée et le fermer sous l'eau à l'aide du bouchon (ou d'un thermomètre à rodage). Mesurer la température ϑ de l'eau. Retirer ensuite le pycnomètre de l'eau, l'essuyer et le porter sur la balance. Noter la masse *m* de l'eau.
Retirer le reste de glace de l'eau et la réchauffer lentement. Effectuer une nouvelle mesure de ϑ et de *m* environ tous les deux degrés, entre 0 et 10 °C, ensuite par intervalles d'environ 10 degrés. Pour ce faire, reverser à chaque fois l'eau du pycnomètre dans le bécher et bien mélanger l'eau.

Exploitation Avec un pycnomètre en verre pyrex (coefficient de dilatation linéaire $\alpha = 3.2 \cdot 10^{-6}$/K), étalonné à 20 °C pour 50 cm^3, on doit obtenir les résultats suivants:



température ϑ en °C	masse *m* en g	densité ρ en g/cm^3
0	49.991	0.999 84
2	49.996	0.999 94
4	49.997	0.999 97
6	49.996	0.999 94
8	49.992	0.999 85
10	49.984	0.999 70
20	49.910	0.998 21
30	49.783	0.995 65
40	49.612	0.992 22
50	49.405	0.988 05

Conclusion A l'aide d'un pycnomètre et d'une balance, on peut déterminer la densité des liquides les plus variés comme, p.ex., celle de l'hexane, de l'alcool éthylique, du chloroforme.

Remarques

– Conformément au tableau, la densité de l'eau varie de 0,00013 g/cm^3, c'est-à-dire de 0,13‰, dans l'intervalle de température de 0 à 4 °C.
  Dans le même intervalle, le volume du verre pyrex change de 0,04‰, celui du quartz change sept fois moins.
  Lorsque le pycnomètre n'est pas en quartz, il est conseillé d'effectuer une correction de volume.
– Lorsqu'on remplit le pycnomètre d'eau à environ 2 °C, on peut observer que, lors du réchauffement, le niveau de l'eau baisse dans le capillaire du bouchon. En maintenant le pycnomètre dans une main chaude, la contraction se fait en l'espace de quelques secondes.
– Mesurer avec particulièrement de soin la densité de l'eau à 20 °C car les burettes, pipettes et éprouvettes graduées sont étalonnées à cette température. La densité est alors approximativement inférieure de 2‰ par arpport à la valeur mesurée à 4 °C.

Densité de l'air

But pédagogique L'air aussi a une masse et une densité !

Exercice Après avoir vidé un ballon de l'air qu'il contenait, on détermine la densité de l'air à partir de la masse et du volume de l'air évacué. Ramener les résultats aux conditions normales de pression et de température.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Pompe à vide (trompe à eau)
Ballon de verre à deux robinets (env. 1 litre)
Seau d'eau
Eprouvette graduée (1 litre)
Thermomètre (température de l'eau)
Thermomètre (température ambiante)
Baromètre (non ajusté au niveau de la mer)

Mode opératoire Afin de simplifier les calculs, l'eau doit avoir la même température que l'air ambiant. Tarer sur la balance le ballon sec rempli d'air. Puis évacuer qu'il contient et le peser. Noter la masse *m* de l'air évacué.
Plonger ensuite le ballon dans le seau d'eau, ouvrir lentement le robinet: le ballon se remplit d'eau, jusqu'à ce que la pression dans le ballon soit la même qu'à l'extérieur. Le niveau d'eau dans le ballon se trouve alors à la même hauteur que dans le seau. Le volume *V* de l'eau qui a pénétré dans le ballon correspond au volume d'air évacué: il peut être déterminé à l'aide d'une éprouvette graduée ou par pesée.

Exploitation La densité est obtenue en calculant le quotient de la masse et du volume

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{en g/dm}^3 \text{ ou kg/m}^3$$

masse d'air évacué		m	en g
volume d'air évacué		V	en dm^3
température ambiante		ϑ	en °C
	d'où	T	en K
pression atmosphérique		p	en mbar

Pour la densité à température ambiante nous avons

$$\rho = \frac{m}{V}$$

et pour la densité normalisée

$$\rho_0 = \frac{m}{V} \cdot \frac{1013 \text{ mbar}}{p} \cdot \frac{T}{273.1\text{K}}$$

(valeur de la littérature 1.293 kg/m³)

Remarques
– Lorsque le volume est mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée, la précision du résultat atteint au mieux à 1%.
– Il est difficile de corriger le résultat en fonction de l'humidité de l'air et de la teneur en CO_2: leur influence est également de l'ordre de 1%.

Densité des gaz

But pédagogique Cette expérience illustre la densité d'un corps gazeux.

Exercice Déterminer la densité d'un gaz à partir du volume et de la masse, et ramener le résultat aux conditions normales.

Matériel
Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Fiole d'Erlenmeyer (env. 1 litre)
Eprouvette graduée (env. 1 litre)
Récipient avec de l'eau
CO_2, He, H_2 ou O_2 d'une bouteille de gaz comprimé
Thermomètre (température ambiante)
Baromètre (non ajusté au niveau de la mer)

Mode opératoire Tarer la fiole d'Erlenmeyer remplie d'air. Faire circuler le gaz pendant quelques secondes par un tuyau muni d'un tube de verre qui touche le fond de la fiole. Lorsque l'indication de la balance ne change plus, arrêter l'arrivée de gaz et lire la masse Δm.
Remplir ensuite la fiole d'Erlenmeyer d'eau et déterminer le volume V à l'aide d'une éprouvette graduée. Le volume peut être déterminé tout aussi commodément, et de manière plus précise, à l'aide de la balance et de la densité de l'eau de 1.00 g/cm^3.

Exploitation La densité du gaz est le quotient de la masse par le volume. La masse du gaz n'est pas mesurée directement; elle est calculée comme suit:

$$m_{\text{gaz}} = m_{(\text{ballon avec gaz})} - m_{(\text{ballon avec air})} + m_{\text{air}}$$
$$= \Delta m + m_{\text{air}}$$

Différence de masse entre le gaz et l'air	Δm	en g
Masse d'air (non mesuré)	m_{air}	en g
Volume de la fiole d'Erlenmeyer	V	en dm^3
Température ambiante	ϑ	en °C
d'où	T	en K
Pression atmosphérique	p	en mbar

La densité du gaz dans les conditions de l'expérience est $\rho_{\text{Gas}} = \frac{m_{\text{gaz}}}{V} = \frac{\Delta m + m_{\text{air}}}{V}$

et dans les conditions normales $\rho_{\text{o gaz}} = \frac{\Delta m}{V} \cdot \frac{1013 \text{ mbar}}{p} \cdot \frac{T}{273.1 \text{ K}} + \rho_{\text{o air}}$

avec $\rho_{\text{o air}} = 1.293$ g/dm^3

Remarques
- La fiole d'Erlenmeyer doit être parfaitement sèche.
- Les bouteilles de gaz comprimé doivent être à la température ambiante.
- Faire entrer les gaz plus légers que l'air (comme l'hélium) par le bas dans l'Erlenmeyer retourné.

Poussée d'Archimède dans les gaz

But pédagogique

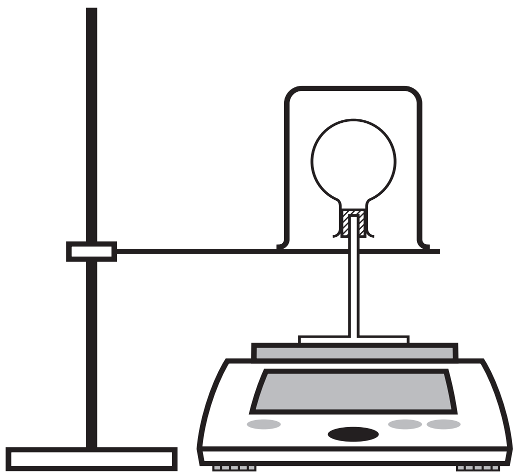
Lorsqu'un corps solide est pesé dans l'air, la poussée d'Archimède est égale, en intensité, au poids de l'air déplacé. La même chose est valable pour d'autres corps gazeux ou liquides. Lors de la détermination de la masse de corps de faible poids spécifique, il faut par conséquent faire une correction de poussée d'Archimède.

Exercice

– Déterminer la différence de poussée verticale entre l'air et l'hélium pour un ballon d'un litre rempli d'air.
– Déterminer la différence de poussée verticale entre l'air et l'hélium pour un ballon d'un litre rempli d'hélium.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
1 ballon d'1 L, avec bouchon (percé à moitié)
1 petit seau de 5 L
Statif
Hélium ou dioxyde de carbone en bouteille en acier
Tube métallique de 210 cm de long B 6 mm, sur pied





Attention !
Risque d'explosion

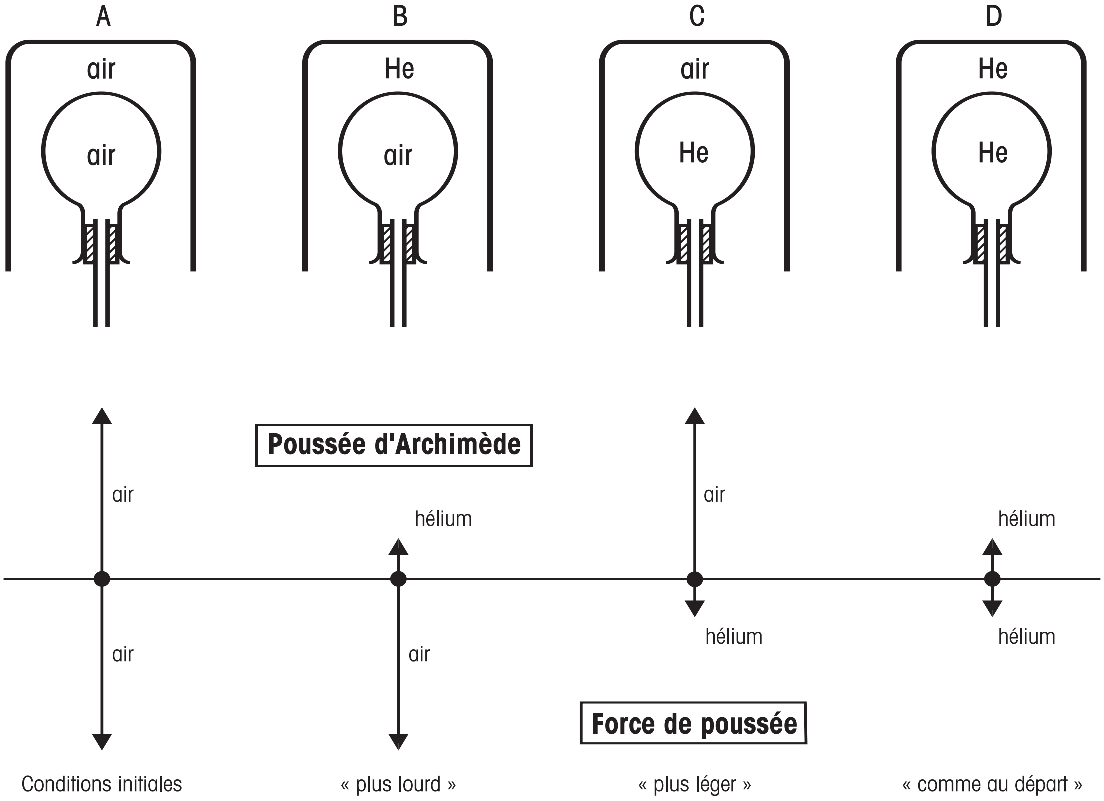
Mode opératoire

Engager le tube dans le bouchon convenablement percé et le poser sur la balance. Fixer à présent le ballon sur le bouchon et lire le poids indiqué. Ensuite, placer le seau au-dessus du ballon et faire entrer l'hélium dans le seau par le bas, jusqu'à ce que le poids soit constant.
Le ballon devient alors « plus lourd » !
Remplir maintenant le ballon d'hélium et le replacer sur la balance.
La balance indique une masse plus petite car la masse de l'hélium dans le ballon est inférieure à celle de l'air. Lorsque le ballon est de nouveau mis dans une atmosphère d'hélium, la balance indique la même masse que si le ballon rempli d'air était entouré d'air.

Exploitation La masse molaire moyenne de l'air (28,8 g/mol) est environ 7 fois supérieure à celle de l'hélium. Le ballon d'un litre est donc soumis à des forces très différentes :

le poids d'environ 1,15 g d'air ou celui d'environ 0,16 g d'hélium

Voici une représentation schématique des forces étudiées :



Développement Des essais équivalents peuvent être réalisés en remplaçant l'hélium par du dioxyde de carbone CO_2.
Comme le CO_2 est plus dense que l'air, il faut inverser le montage :

- le seau se trouve en bas.
- le ballon est suspendu à la balance et plonge dans le seau.
- la balance repose sur le statif ou plus simplement sur un escabeau à poignée évidée. Le ballon est accroché au crochet qui se trouve au plancher de la balance. Il faut cependant mettre la balance en marche au préalable.

Le ballon d'un litre contient environ 1,75 g de dioxyde de carbone de sorte que les « différences de poids » avec le CO_2 sont moitié moins grandes qu'avec le He, comme le montre la comparaison des masses molaires :

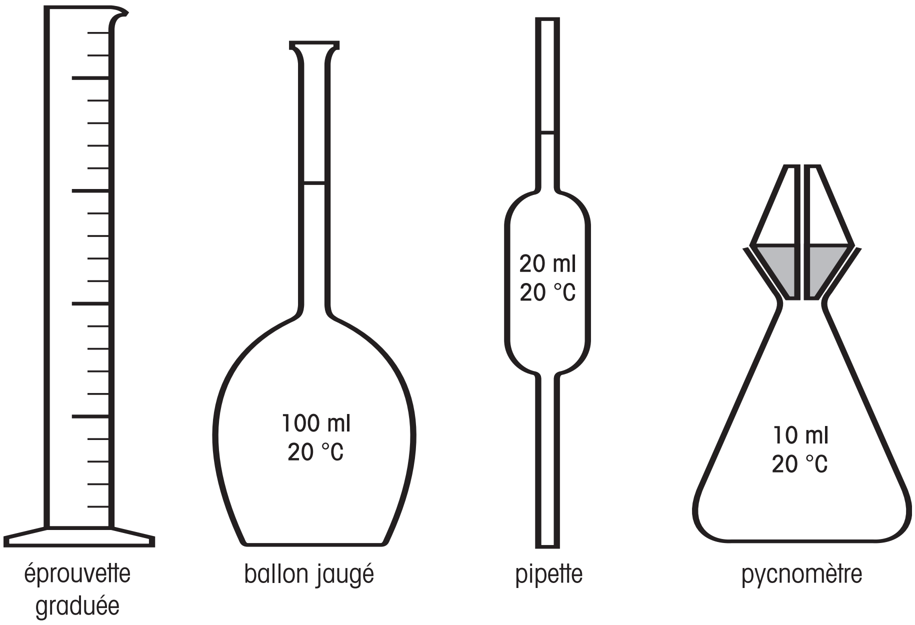
$$\frac{44-28.8}{28.8-4} = 0.61$$

Densité des liquides

But pédagogique Déterminer la densité de liquides à partir des mesures de masse et de volume.

Exercice Déterminer la densité de divers liquides tels que l'eau, l'alcool, le chloroforme, l'hexane, l'essence.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Eprouvettes graduées, ballons jaugés, pipettes, pycnomètres, béchers
Divers liquides, voir plus haut



Mode opératoire Tarer les récipients de verre (pycnomètre, bécher ou éprouvette graduée) puis y verser les liquides à étudier. Noter la masse.

Exploitation La densité est tirée du quotient de la masse par le volume.

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$

ρ_t = densité à la température t
m = masse
V = volume
t, ϑ = température du liquide

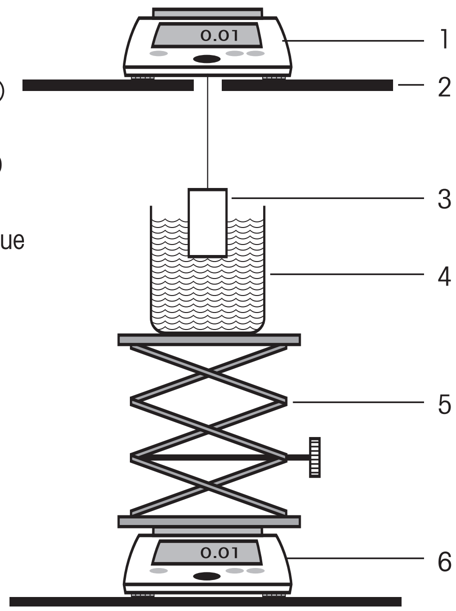
Conclusion Comme la densité des liquides dépend de la température, il faut indiquer la température.
Pour les mesures très précises il faut également faire une correction de poussée d'Archimède.

Remarque Pour les expériences effectuées avec des élèves, les liquides ne doivent être ni agressifs ni toxiques. Le tétra-chlorure de carbone, le benzène, ainsi que les acides et bases concentrées sont à proscrire.

Action et réaction

Thème de l'expérience

Les forces apparaissent toujours par paires. Lorsqu'un corps exerce une force sur un autre, ce dernier agit sur le premier avec une force opposée.
a) de même grandeur
b) dirigée dans le sens opposé
c) selon la même ligne d'action
(Principe de l'action et de la réaction de Newton)



Montage expérimental

1 balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
2 tabouret, statif ou autre matériel analogue
3 corps suspendu
4 bécher rempli de liquide, p. ex. eau
5 support élévateur
6 balance no 2 (comme ci-dessus)

Mode opératoire

a) Mettre en marche les deux balances non chargées (!), conformément au mode d'emploi.
b) Suspendre un corps à la balance supérieure, poser le bécher rempli de liquide et le plateau réglable sur la balance inférieure.
c) Hisser le bécher, de manière à faire plonger de plus en plus le corps suspendu dans le liquide.
d) Comme l'indique la balance supérieure, le corps est repoussé vers le haut par le liquide et semble s'alléger.
La balance inférieure indique que le liquide (plus le bécher et le support élévateur) est poussé vers le bas par le corps qui y plonge et semble s'alourdir.
Les deux modifications ont exactement la même ampleur.

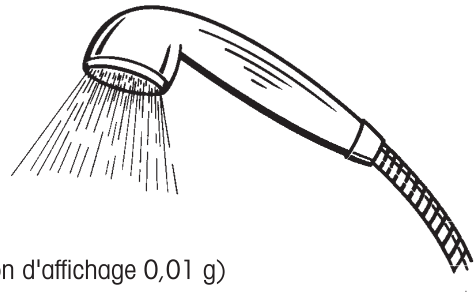
Critique

a) Négative: l'emploi de deux balances électroniques avec afficheur pour rétroprojection peut paraître très coûteux.
La seconde balance devrait cependant pouvoir se trouver facilement dans une autre section technique, dans un établissement de taille moyenne.
b) Positive:
1) Le montage est évident et ne nécessite pas d'explications supplémentaires.
2) La mise en oeuvre de l'appareillage est simple, sans problème particulier.
3) La démonstration peut se faire sans perte de temps inutile.
4) L'attention des élèves reste soutenue, parce qu'on peut sans cesse faire varier la hauteur du support élévateur et obtenir par tarage successif autant de valeurs qui permettent de vérifier la loi sans même avoir recours au calcul mental.
5) D'autres expériences concernant l'action et la réaction sont souvent plus confuses et exigent de longues explications.

Le montage plus coûteux est ainsi justifié.

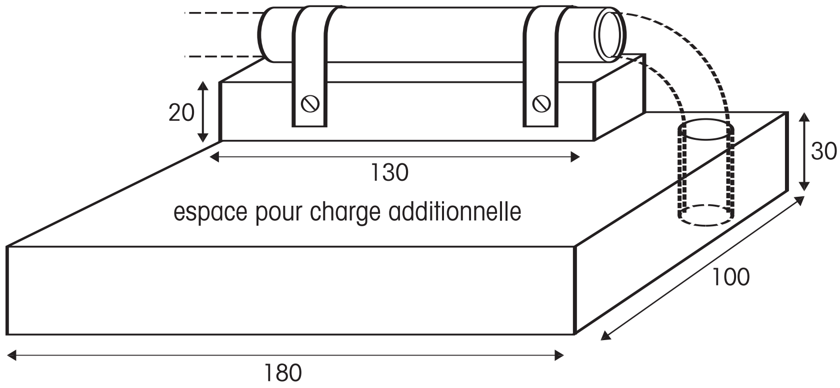
Force déflectrice

But pédagogique Pour changer la direction d'un courant, il faut appliquer une force normale, c'est-à-dire perpendiculaire à sa direction d'écoulement.

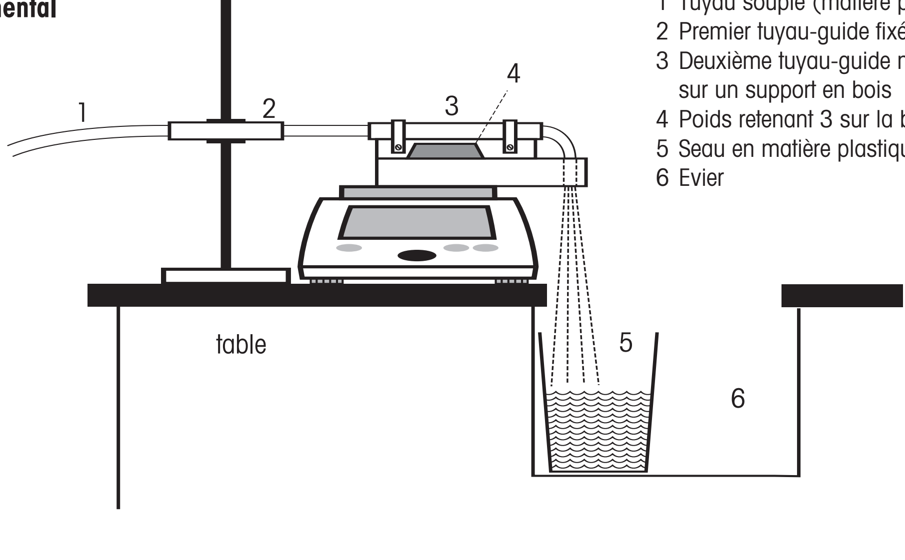


Exercice Etudier la force qui dévie l'eau traversant un tuyau courbé en angle droit.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Tuyau de matière plastique, diamètre extérieur p.ex.12 mm, intérieur 8 mm, longueur selon les besoins
Raccord de tuyau sur le robinet d'eau
Premier tuyau-guide d'environ 20 cm de long, diamètre intérieur à peine supérieur au diamètre extérieur du tuyau souple
Statif anti-dérapant et pinces pour maintenir le tuyau en position horizontale
Seau en matière plastique 5 litres
Balance METTLER TOLEDO p.ex. plage de pesée 0 à 6 kg ou éprouvette graduée 1000 mL
Chronomètre
Deuxième tuyau-guide sur support en bois (pour fixer le tuyau sur la balance), p.ex.



Montage expérimental



1 Tuyau souple (matière plastique)
2 Premier tuyau-guide fixé au statif
3 Deuxième tuyau-guide monté sur un support en bois
4 Poids retenant 3 sur la balance
5 Seau en matière plastique
6 Evier

Fixer le premier tuyau-guide à l'aide du statif, à la même hauteur que le second. Le support en bois de ce dernier ne doit pas pouvoir glisser sur la balance; le cas échéant, le charger d'un poids additionnel. Un tuyau plus long est plus facile à poser, mais pour une longueur double, la vitesse d'écoulement diminue environ de moitié et la force maximale tombe à environ un quart.

Considérations théoriques

Pour cette expérience, il est essentiel que le plateau de la balance à compensation METTLER TOLEDO reste exactement à la même hauteur au-dessus de la table, même lorsque la charge varie. Le tuyau souple n'a ainsi pas besoin de se déformer et les mesures ne sont pas faussées par des forces de déformation.
L'eau est déviée par le tuyau et exerce donc une force opposée vers le haut, sur le tuyau. La balance mesure la composante verticale F de cette force. Elle dépend de la vitesse moyenne $\bar{v}$ de l'eau, qui peut être calculée à partir du volume ΔV débité au cours du temps Δt, et de la section intérieure A:

$$\bar{v} = \frac{\Delta V / \Delta t}{A}$$

Mode opératoire

a) Faire couler très légèrement l'eau, juste assez pour que des bulles d'air ne remontent pas à partir de l'extrémité du tuyau, et tarer la balance.
b) Ouvrir quelque peu le robinet et mesurer la force F.
c) Tenir le seau vide sous le jet d'eau au cours d'un intervalle de temps Δt correctement choisi. Surveiller en même temps l'indication de la balance car la pression peut varier brièvement dans la conduite d'alimentation.
d) Le volume d'eau dans le seau est déterminé, soit à l'aide d'une éprouvette graduée, soit de manière plus rapide et plus précise, à l'aide d'une seconde balance.
e) Répéter les étapes b) à d) avec d'autres intensités de débit.
Etablir un tableau avec F, Δt, ΔV, $\bar{v}$

Exploitation

En admettant, en première approximation et donc de façon pas entièrement exacte, que chaque particule d'eau est animée de la même vitesse de déplacement

$$v = \bar{v} = \frac{\Delta V / \Delta t}{A} \qquad (1)$$

on obtient pour le volume qui passe dans l'intervalle de temps δt
par la section A, $\delta V = A \cdot v \cdot \delta t$.
La masse correspondante $\delta m = \rho \cdot \delta V$
possède une quantité de mouvement $\delta p = v \cdot \delta m = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \delta t$.

Elle est d'abord horizontale, puis dirigée vers le bas. Au cours du temps δt la force $(-\vec{F})$ du tuyau entraine donc une impulsion vers le bas:

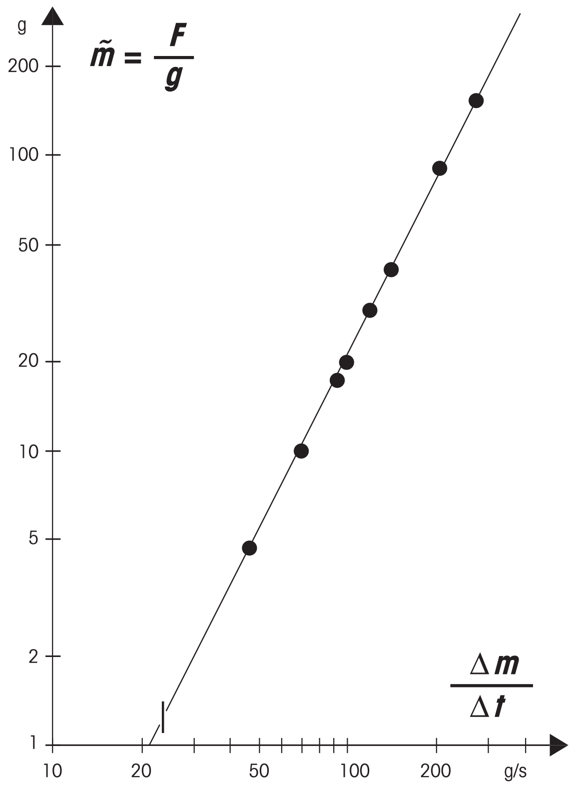
$$F \cdot \delta t = \delta p = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \delta t$$

$$F = \rho \cdot A \cdot v^2 = \rho \cdot \frac{(\Delta V/\Delta t)^2}{A}$$

$$\boxed{F = \frac{(\Delta m/\Delta t)^2}{\rho \cdot A}} \qquad (2)$$

et la lecture sur la balance

$$\tilde{m} = \frac{F}{g} = \frac{(\Delta m/\Delta t)^2}{\rho \cdot A \cdot g} \qquad (3)$$



Exemple de valeurs :

Eau dans le seau			Valeur lue sur la balance (F)	
Δm	Δt	$\Delta m/\Delta t$	$\tilde{m}$	
1028 g	43.6 s	23.6 g/s	1.2	± 0.2 g
2210 g	46.5 s	47.5 g/s	4.85	± 0.2 g
1420 g	20.1 s	70.6 g/s	10.0	g
3140 g	34.2 s	91.8 g/s	17.5	g
1996 g	20.0 s	99.8 g/s	20.0	± 0.2 g
2401 g	19.9 s	120.7 g/s	30.1	g
2566 g	18.3 s	140.2 g/s	41.0	g
3380 g	16.2 s	208.6 g/s	91	± 0.5 g
3244 g	11.7 s	276.6 g/s	157	± 0.4 g

La relation déterminée par mesure entre $\Delta m/\Delta t$ et $\tilde{m}$ l (F) se représente préférentiellement sur papier bi logarithmique :

Une droite de pente égale à 2 est tracée. Les points de mesure sont pratiquement confondus avec la droite, ce qui confirme la relation du second degré entre $\Delta m/\Delta t$ et $\tilde{m}$.
Les valeurs du tableau ci-dessus ne sont pas évidemment inventées, mais bien réelles. Elles ont été effectivement mesurées avec un tuyau souple de 8,0 mm de diamètre intérieur. Comment s'harmonisent-elles avec l'équation (3)? La cinquième mesure donne par exemple

$$\left.\begin{aligned} \Delta m/\Delta t &= 99.8 \text{ g/s} \\ \rho_{eau} &= 1.00 \text{ g/cm}^3 \\ A_{tuyau} &= \pi \cdot (0.40 \text{ cm})^2 \\ g &= 981 \text{ cm/s}^2 \end{aligned}\right\}$$

insérés dans l'équation (3)
$\tilde{m}_{calculée} = 20.2$ g au lieu de
$\tilde{m}_{mesurée} = 20.0$ g ±0.2 g

La concordance est étonnamment bonne. Et pourtant les particules d'eau ne se déplacent pas toutes à la même vitesse !

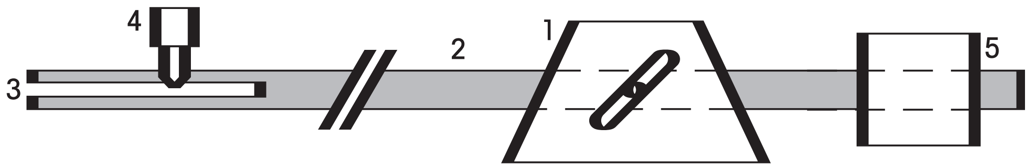
Conclusion L'expérience peut être réalisée en 20 minutes. Elle permet de réviser les notions « d'action et de réaction », « de modification de la quantité de mouvement égale l'impulsion », « de représentation bi logarithmique ».

Résistance de l'air

But pédagogique Dans un fluide en mouvement, un corps est soumis à une force de résistance F, qui dépend de la taille (A) et de la forme (c_W) du corps, ainsi que de la densité ρ et de la vitesse relative v du fluide.

Exercice Etudier la force de résistance de différents corps, dans un courant d'air produit par une soufflerie.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Soufflerie
Si possible : tube de Pitot avec manomètre, pour la mesure de la vitesse de l'air
Différents corps (avec tiges-supports)
- de section apparente identique autant que possible: p.ex. disque circulaire, sphère, demi-sphère pleine, demi-sphère creuse, corps aérodynamique, modèles de véhicules
- de même forme; p.ex. disques circulaires ou plaques carrées, petits, moyens, grands
- tiges-supports seules, sans corps résistant
  Support du corps résistant, p.ex.

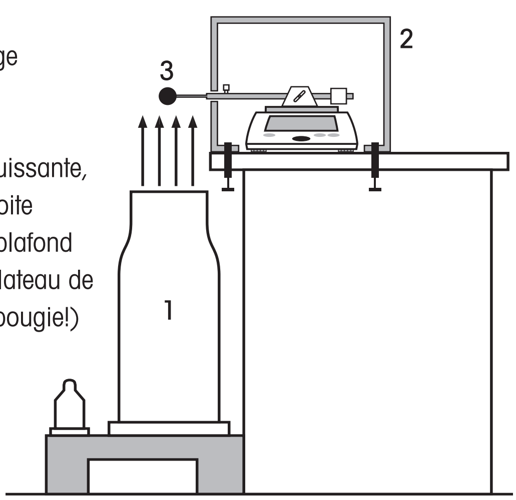


1) pied cylindrique avec alésage supplémentaire transversal de 8,2 mm de diamètre
2) tige d'aluminium de 8 mm de diamètre, longueur 400 mm
3) alésage destiné à recevoir les tiges-supports des corps résistants
4) vis M3 de blocage d'alignement
5) éventuellement un contre-poids

Pour protéger la balance des courants d'air, utiliser p.ex. une boite de carton de 60 cm x 60 cm x 40 cm :
- ouverte vers l'expérimentateur
- fixée à la table par deux pinces
- dont le fond est découpé de manière à ce que la balance repose directement sur la table
- avec une petite ouverture latérale pour la tige en aluminium (2) du support.

Montage expérimental Lorsqu'on utilise une soufflerie relativement puissante, on ne peut se passer de la protection d'une boite en carton, car le courant d'air renvoyé par le plafond entraine des turbulences qui agissent sur le plateau de la balance (vérifier à l'aide d'une flamme de bougie!)

1. Soufflerie
2. Boîte en carton
3. Corps résistant sur son support



Mode opératoire

a) Essai préliminaire : déterminer à l'aide d'un tube de Pitot à quel endroit le courant d'air possède une vitesse uniforme.

b) Remarque pour tous les essais ultérieurs : il s'agit de mesurer la force de résistance *F*(corps) agissant sur le corps seul. Mais le courant d'air agit également sur le support, de sorte que la balance indique *F*(mesure). Il faut donc procéder à une deuxième mesure avec la tige seule, sans le corps, afin de déterminer la force *F*(tige). On aura alors *F*(corps) = *F*(mesure) – *F*(tige).

c) Mesurer la force de résistance *F* sur un corps à différentes vitesses de l'air *v*. Etablir un tableau avec *v*, *F*(mesure), et *F*(corps).
Répéter le cas échéant avec un corps de forme ou de taille différente.

d) A une vitesse de l'air constante, déterminer *F*(corps) pour des corps de taille (*A*) différente et de forme identique. Etablir un tableau avec *A*, *F*(corps), et *F*(corps)/*A*.
Répéter éventuellement avec des corps de forme différente.

e) A vitesse de l'air constante, déterminer *F*(corps) pour des corps de forme différente et de même section apparente *A*.
Tableau avec croquis de la forme et *F*(corps).
Répéter éventuellement avec une vitesse de l'air différente.

f) La durée nécessaire à chaque mesure est d'environ une à deux minutes et dépend énormément de l'adresse et de l'entraînement de l'expérimentateur.

Exploitation

Pour un écoulement turbulent, la théorie donne

Pour la pression dynamique $p_{\text{Stau}} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

et pour la force de résistance $F = c_r \cdot p_{\text{Stau}} \cdot A$

ρ = densité du fluide en mouvement
c_r = paramètre de résistance (facteur de forme)
A = section apparente (aire de la projection du corps sur un plan perpendiculaire à la direction du courant)

Il faut donc trouver

pour c) une relation proportionnelle entre v^2 et les forces de résistance [*F*(mesure), *F*(tige), *F*(corps)];

pour d) un quotient constant *F*(corps)/*A*;

pour e) c_w ◗ > c_w ▌ > c_w ● > c_w 

Conclusion

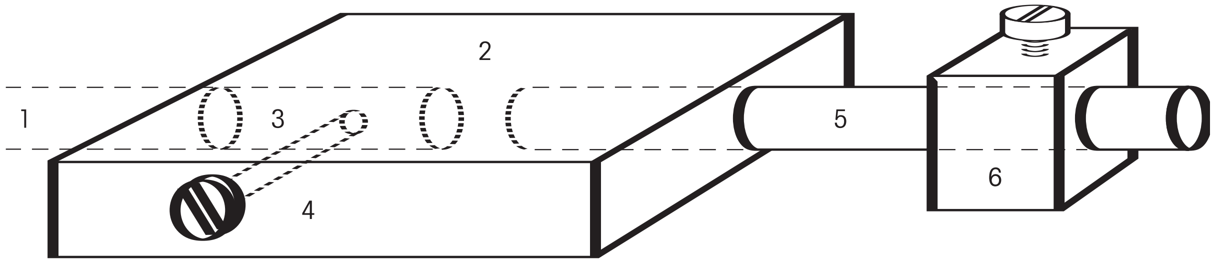
Cette expérience convient bien à la démonstration pendant un cours, car on peut travailler rapidement.

Forces agissant sur une aile portante

But pédagogique Un corps balayé asymétriquement est soumis à une composante de force perpendiculaire à la direction du courant, en plus d'une force de résistance F_R dirigée dans le sens du courant. Pour une aile portante, cette force normale est la portance F_P.

Exercice Etudier à l'aide d'une plaque plane et d'une aile portante la force de résistance F_R, indésirable, et la force de portance F_P, ainsi que leur quotient F_P/F_R en fonction de l'angle d'incidence α.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g)
Soufflerie
Si possible : tube de Pitot avec manomètre pour la mesure de la vitesse de l'air
Modèle d'aile portante à tôles de guidage parallèles très fines et support orientable
Planchette (en bois, matière plastique ou métal) avec tôles de guidage et support orientable
Pied-support antidérapant à alésage vertical
Support pour la fixation horizontale des modèles, p.ex. bloc de bois :

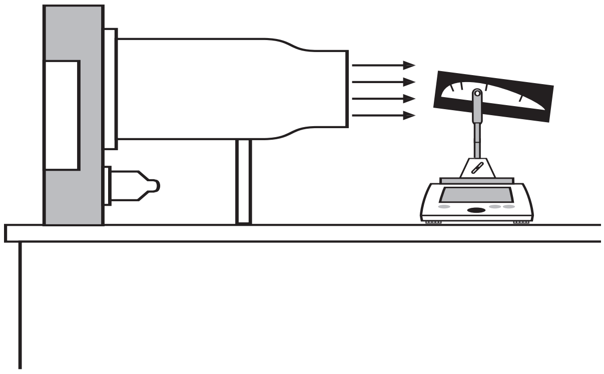


1) tige orientable supportant le modèle
2) bloc de bois de 180 mm x 100 mm x 30 mm
3) alésage recevant la tige 1)
4) éventuellement vis permettant de bloquer l'alignement de la tige 1)
5) tige de 10 mm de diamètre, solidement engagée dans le bloc de bois
6) contrepoids d'environ 1 kg, p. ex. pied cylindrique

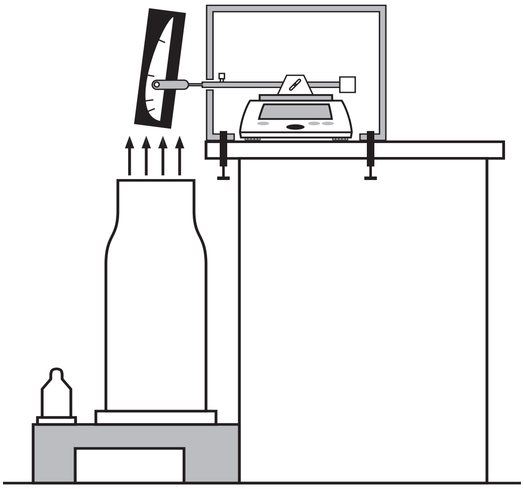
Pour protéger la balance des courants d'air, p. ex. une boîte de carton de 60 cm x 60 cm x 40 cm
– ouverte vers l'expérimentateur
– fixée à la table par deux pinces
– dont la base est découpée de manière à ce que la balance repose directement sur la table
– avec une petite ouverture latérale pour la tige 1)

Montage expérimental Des montages différents sont nécessaires pour la mesure de la force de résistance et de portance :

Portance



Force de résistance



Lorsqu'on utilise une soufflerie relativement puissante, il est nécessaire d'utiliser une boite de carton de protection, car le courant d'air réfléchi par le plafond provoque des turbulences qui agissent sur le plateau de la balance. (Vérifier à l'aide d'une flamme de bougie !)

Mode opératoire

a) Examiner la distribution de vitesse dans le courant d'air devant la soufflerie à l'aide d'un tube de Pitot.

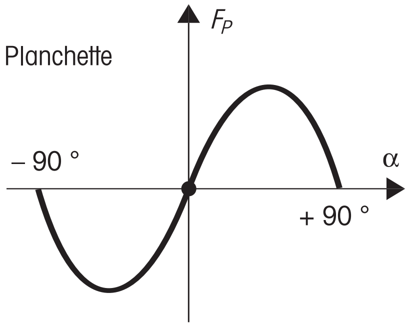
b) Force de portance F_p : elle peut être calculée théoriquement à l'aide de la formule suivante :

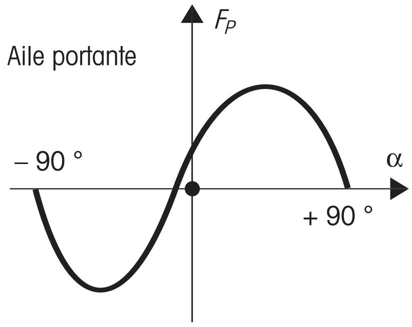
$$F_P = c_P \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

c_P = paramètre de portance, dépendant de la forme
A = section apparente (aire de la projection du corps sur un plan perpendiculaire à la direction du courant)
ρ = densité del'air
v = vitesse du vent (vitesse relative de l'air par rapport au corps)

Etudier la portance en fonction de la vitesse de l'air.
Tableau avec v, F_p, graphiques.
Répéter éventuellement avec un autre profil et un autre angle d'incidence.

c) Choisir une vitesse de l'air constante pour les mesures suivantes ; à l'endroit du profil elle sera v^*.
Mesurer la portance en fonction de l'angle d'attaque α d'abord pour planchette, puis pour l'aile portante.





d) Force de résistance : elle aussi est proportionnelle à la pression dynamique

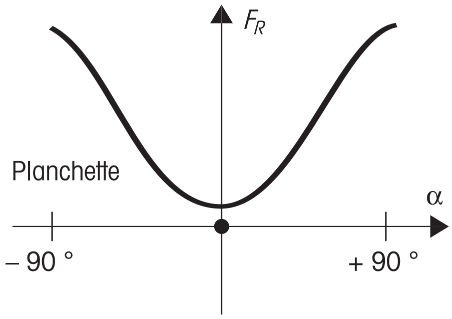
$$(p_{\text{dyn}} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2), \text{ donc } F_R \sim v^2.$$

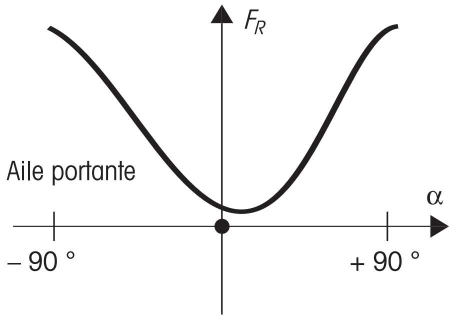
Le vérifier autant que possible.

e) Comme le courant d'air ne frappe pas seulement le corps étudié mais aussi son support, il faut mesurer F_R (support), dans un essai préliminaire sans le corps, c.-à-d. avec le support seul. Les mesures F_R (totale) ultérieures doivent être corrigées :

$$F_R\,(\text{modèle}) = F_R\,(\text{totale}) - F_R\,(\text{support})$$

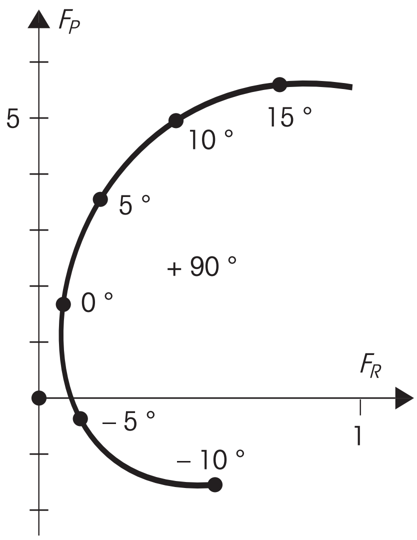
f) Pour les mesures suivantes, régler à nouveau la vitesse de l'air frappant le corps comme plus haut, $v = v^*$. Puis mesurer la résistance F_R (totale) en fonction de l'angle d'attaque α pour la planchette et l'aile portante.
Tableau avec α, F_R (totale), F_R (modèle), graphiques.





Temps nécessaire Un expérimentateur entraîné a besoin d'environ 45 minutes pour les mesures seules. Un groupe d'élèves a besoin de trois à quatre heures avec les exploitations.

Exploitation D'habitude F_p et F_R de l'aile portante sont représentées sur un diagramme polaire selon Lilienthal. Pour une interprétation plus poussé, faire appel à des ouvrages techniques comme, par exemple, documents pour écoles de vol à voile.



Conclusion L'appareillage est d'un emploi commode mais l'expérience demande un travail attentif et une exploitation soignée. Malgré des exigences élevées, ces essais sont appréciés par les élèves, en travaux pratiques.

Intensité du champ magnétique d’une bobine en fonction de l’intensité du courant

But pédagogique

L’intensité du champ magnétique d’une bobine est proportionnelle à l’intensité du courant.

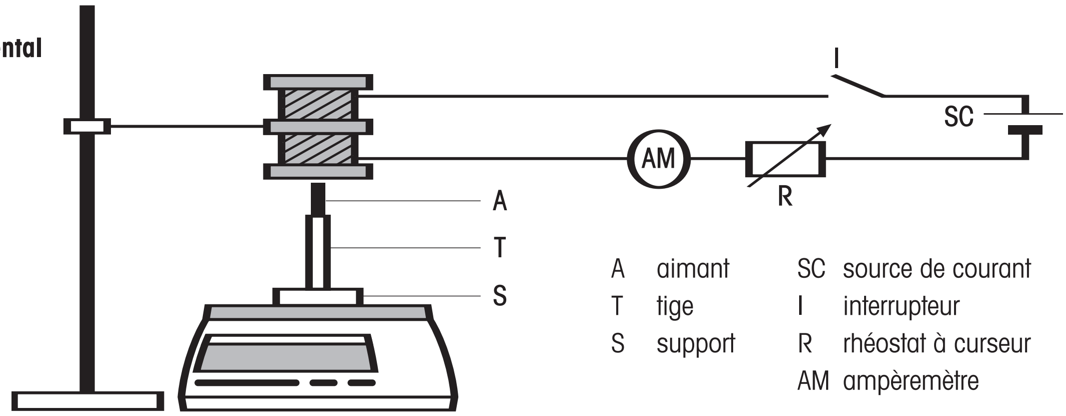
Exercice

Mesurer la force exercée sur un petit barreau aimanté par le champ magnétique d’une bobine, en fonction de l’intensité du courant traversant la bobine.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d’affichage 0,01 g)
Bobine sans noyau (p.ex. 7 cm de long, 4 cm de diamètre, 250 spires)
Source de courant continu capable de délivrer environ 5 à 10 A
Rhéostat à curseur (p.ex. 6 Ω) lorsque la source de courant continu ne peut pas être régulée
Interrupteur
Ampèremètre
Câbles électriques
Statif
Petit aimant permanent, p.ex. barreau cylindrique
Tige non magnétique (aluminium, bois) d’env. 15 cm de long sur support léger

Montage expérimental



Coller l’aimant sur la surface frontale supérieure de la tige à l’aide d’un peu de graisse. Placer la bobine de manière à ce que l’aimant se trouve juste à l’extrémité de la bobine.

Mode opératoire

Vérifier tout d’abord si le champ magnétique de la bobine agit directement sur la balance et si l’indication de la balance change lorsqu’on fait passer le courant: on s’aperçoit que les balances METTLER TOLEDO sont pratiquement insensibles à des champs magnétiques extérieurs !
Veiller de plus à ce que l’aimant ne puisse pas se déplacer par rapport à la bobine au cours d’une série de mesures, car le champ de la bobine est hétérogène. Dans ce contexte, une balance travaillant selon le principe de compensation des forces évite les problèmes, car le plateau de la balance reste à la même hauteur au-dessus de la table, quelle que soit la charge.
Après avoir taré la balance, augmenter progressivement l’intensité du courant I. Les valeurs correspondantes I et m (pour la force) sont portées dans un tableau en vue d’une représentation graphique ultérieure. Il apparaît que la force est directement proportionnelle à l’intensité du courant. Donc l’intensité du champ magnétique est également proportionnelle à l’intensité du courant.

Fer doux dans un champ magnétique

But pédagogique Le fer doux s'aimante dans un champ magnétique extérieur et est soumis à une force d'attraction lorsque le champ et hétérogène.

Exercice Mesurer la force agissant sur une pièce de fer doux, dans le champ magnétique d'une bobine, en fonction de l'intensité du courant électrique dans la bobine.

Matériel Identique à celui de l'expérience précédente, page 25. Seul l'aimant est remplacé par une pièce de fer doux, p.ex. une vis en fer de taille comparable.

Montage expérimental Comme pour l'expérience, page 25.

Mode opératoire et exploitation Le principe de mesure correspond en tout point à celui de l'expérience, page 25. Par contre, la relation entre *I* et *m* (pour *F*) s'avère ne pas être une relation linéaire.

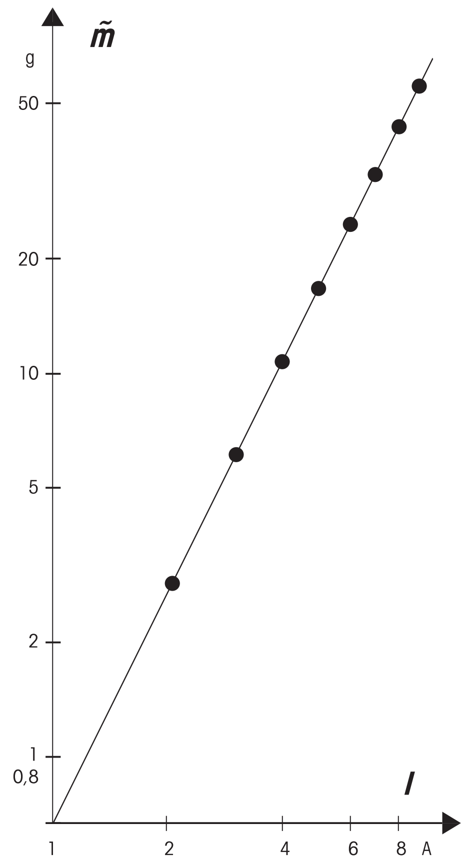
Exemple de mesures effectuées avec une vis Allen M8 de 25 mm de long :

Intensité de courant I	Indication de la balance $\tilde{m}$
0,99 A	0,78 g
2,02 A	2,88 g
3,02 A	6,08 g
4,01 A	10,75 g
4,99 A	16,86 g
6,00 A	24,46 g
7,00 A	33,41 g
8,01 A	44,04 g
9,05 A	56,00 g

Les forces observées pour 3 A et 6 A laissent supposer une relation du second degré :

$$\tilde{m} = k \cdot I^2$$

On peut le vérifier le plus aisément par représentation graphique sur papier bi logarithmique :

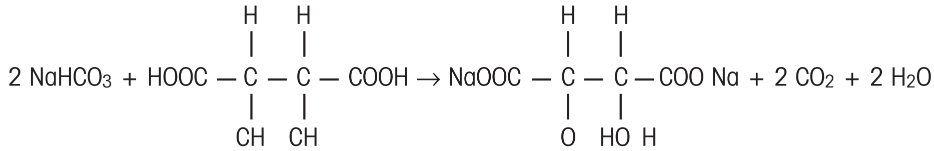


La droite du graphique a exactement une pente de 2. Comme les points de mesure tombent bien sur la droite, la supposition est confirmée: $F \sim I^2$

Conclusion Dans l'expérience, page 25, l'aimant permanent est soumis, dans le champ magnétique extérieur, à une force proportionnelle à l'intensité du courant électrique. Ici par contre, la pièce de fer est d'abord aimantée par le champ de la bobine. Ensuite elle est soumise à la force correspondante *F* qui dépend d'une part, de l'intensité du champ magnétique *H* de la bobine et d'autre part, de l'aimantation *J* de la pièce de fer. A partir des relations $F \sim H \cdot J$ et $H \sim I$ et $F \sim I^2$ on déduit que $J \sim I$, c.-à-d. que dans le domaine d'intensité de champ magnétique considéré, l'aimantation de la pièce de fer est proportionnelle à l'intensité du courant électrique.

Combien d'hydrogénocarbonate de sodium contient un comprimé effervescent ?

Théorie Outre la substance active, les comprimés effervescents (de vitamines, de limonade, etc.) contiennent également du sucre, des arômes, des colorants alimentaires, ainsi que de l'acide tartrique et de l'hydrogénocarbonate de sodium. Lorsqu'un tel comprimé est mis dans l'eau, l'hydrogénocarbonate de sodium réagit avec l'acide tartrique pour donner du tartrate de sodium bien soluble, du dioxyde de carbone et de l'eau. Le dioxyde de carbone gazeux s'échappe et le comprimé se dissout. Equation de la réaction:



hydrogénocarbonate de sodium — acide tartrique — tartrate de sodium — dioxyde de carbone

La teneur en hydrogénocarbonate de sodium peut être déterminée à partir de la quantité de dioxyde de carbone formée.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g), fiole d'Erlenmeyer à col large de 300 mL, tige de verre, comprimés effervescents, calculatrice de poche, gobelets à jeter, serviettes en papier, sceau à ordures.

Mode opératoire

1. Mettre env. 2 dl d'eau de robinet dans la fiole d'Erlenmeyer, bien l'essuyer à l'extérieur, la poser sur la balance et tarer.
2. Poser un comprimé effervescent sur le plateau de la balance à côté de la fiole d'Erlenmeyer, déterminer sa masse et noter le résultat.
3. Tarer à nouveau avec le comprimé.
4. Immerger avec précaution le comprimé dans l'eau (sans éclaboussures), attendre la fin de la réaction, bien agiter à l'aide de la tige de verre et déterminer la masse du dioxyde de carbone qui a été libéré. Noter le résultat.
5. Si vous le désirez, vous pouvez verser la boisson obtenue dans un gobelet et la boire. Sinon jeter la solution.
6. Rincer soigneusement la fiole d'Erlenmeyer et bien la sécher à l'extérieur. Elle est alors prête pour l'essai suivant.

Résultats et exploitation Masse du comprimé : a = …g ; masse de CO_2 : b = …g

1 g de CO_2 dégagé correspond à une teneur de 1.91 g de $NaHCO_3$
b g de CO_2 dégagés correspondent à une teneur de 1.91 · b g de $NaHCO_3$

La teneur du comprimé en $NaHCO_3$ en pourcent est de : $\frac{1.91 \cdot b \cdot 100}{a}$ %

Exemple chiffré Les valeurs suivantes ont été trouvées lors d'un essai
masse du comprimé : a = 4.38 g; masse de CO_2 : b = 0.23 g

La teneur du comprimé en $NaHCO_3$ et en pourcent est de :

$$\frac{1.91 \cdot 0.23 \cdot 100}{4.38} \% = 10.03\% \sim \underline{10\%}$$

Teneur en graisse du soja et de noix

Théorie

De nombreux produits alimentaires comme les graines de soja, d'arachide, les noisettes, les graines de tournesol, etc., contiennent des graisses végétales qui sont relativement faciles à extraire à l'aide d'un solvant lipophile. Ces produits jouent également un rôle important dans la production d'huiles et de graisses alimentaires.
Afin de déterminer la teneur en graisses, les noix, graines ou fèves sont finement moulues et soumises à une extraction par l'éther de pétrole, l'hexane ou d'autres solvants. Afin de lier l'eau éventuellement présente, on ajoute du sulfate de magnésium anhydre. La graisse pure est obtenue par filtrage de la solution et évaporation du solvant, puis elle est pesée.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0.01 g), fiole d'Erlenmeyer de 100 ml, avec bouchon à rodage, ou éprouvette graduée, éther de pétrole ou hexane, sulfate de magnésium anhydre, entonnoir, papier filtre ou ouate, bécher 100 ml, pipette 10.0 ml.
Farine de graines de soja, de noisettes ou de graines d'arachide.

Mode opératoire

1. Peser environ 3 g de farine de soja, de noisettes ou d'arachide.
2. Verser la farine dans la fiole d'Erlenmeyer ou l'éprouvette graduée, la recouvrir de 40 mL d'éther de pétrole ou d'hexane, ajouter 5 g de sulfate de magnésium anhydre et agiter vigoureusement de temps à autre, pendant 5 minutes. Ouvrir brièvement le bouchon à rodage avant et après l'agitation, afin d'équilibrer la pression.
3. Filtrer une partie de la suspension obtenue sur papier filtre ou de l'ouate dans un récipient sec qui pourra être bouché (p.ex. une fiole d'Erlenmeyer à bouchon ou un bécher fermé par un verre de montre). On empêche ainsi l'évaporation du solvant.
4. Pipeter à présent exactement 10.0 mL du filtrat dans un petit bécher pesé au préalable et évaporer l'échantillon sur bain-marie sous une hotte, jusqu'à ce que l'odeur de solvant ait complètement disparu.
5. Peser l'échantillon après retour à la température ambiante.

Résultat et exploitation

La teneur en graisse est déterminée à partir du poids de l'échantillon de produit alimentaire (a = …g) et de la masse du résidu (b = …g) qui consiste en graisse pure :

$$\text{teneur en graisse} = \frac{100 \cdot 4 \cdot b}{a} \%$$

Exemple numérique

Une prise de a = 3.00 g de farine de noisettes a donné, après évaporation de 10.0 mL de la solution d'extraction, un résidu de b = 0.52 g de graisse, ce qui correspond à une teneur en graisse d'environ 70 %.

Détermination du carbonate de calcium dans des échantillons de roches et de sols

Théorie Le carbonate de calcium d'échantillons de roches ou de sols peut être déterminé en le faisant réagir avec l'acide chlorhydrique. Il se forme alors du chlorure de calcium, de l'eau et du dioxyde de carbone. Ce dernier s'échappe de la solution de réaction et est pesé :

$$CaCO_3 + 2\ HCl \rightarrow Ca^{2+} + 2\ Cl^- + H_2O + CO_2$$

Cette méthode de détermination est simple et assez précise.

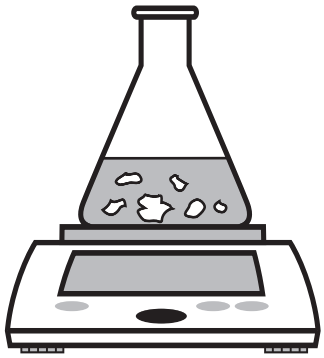
Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g), fiole d'Erlenmeyer de 100 ml, HCl concentré. eau distillée, poire en caoutchouc, échantillon de calcaire (env. 1 g).

Mode opératoire

1. Mettre environ 8 mL d'HCl concentré. et environ 10 ml d'eau dist. dans la fiole d'Erlenmeyer.
2. Placer la fiole d'Erlenmeyer avec l'acide chlorhydrique sur la balance et tarer.
3. Poser l'échantillon de calcaire à côté de la fiole sur le plateau de la balance, déterminer la masse et tarer à nouveau.
4. Immerger ensuite l'échantillon de calcaire dans la solution. Il produit aussitôt une intense réaction avec départ de dioxyde de carbone.
5. Après la fin de la réaction, envoyer un peu d'air au-dessus de la surface de la solution à l'aide de la poire en caoutchouc et d'une pipette, afin de chasser un éventuel reste CO_2.
6. Peser à nouveau et déterminer la perte de CO_2.

Montage expérimental : fiole d'Erlenmeyer avec acide chlorhydrique et morceau de calcaire

balance de précision METTLER TOLEDO



Résultat et exploitation 1.58 g de calcaire ont dégagé 0.386 g de CO_2. D'après l'équation de la réaction et les rapports stœchiométriques

$$CaCO_3 + 2\ HCl \rightarrow Ca^{2+} + 2Cl^- + H_2O + CO_2$$

100 g/mol	44 g/mol
1.58 g	x g

1.58 g de $CaCO_3$ pur devraient libérer $x = \dfrac{1.58\ g \cdot 44\ g/mol}{100\ g/mol} = x = \underline{0.695\ g\ CO_2}$

Comme l'échantillon n'a libéré que 0.386 g de CO_2, donc 55.54 %, de 0.695 g, la teneur en carbonate de calcium de l'échantillon de calcaire est de 55.54 %.

Remarque La précision de la méthode peut être vérifiée à l'aide de $CaCO_3$ pur.

Détermination de l'eau de cristallisation de sels

Théorie

De nombreux sels cristallisés contiennent de l'eau liée, qui peut être éliminée par chauffage. Les molécules d'eau se détachent alors du sel hydraté et s'évaporent. Il reste le sel anhydre :

$$\text{sel hydraté} \xrightarrow{\text{chauffage}} \text{sel anhydre + eau}$$

Lorsqu'on détermine exactement la perte d'eau par pesée, on peut calculer le nombre de molécules d'eau liées ou ce qu'on appelle « l'eau de cristallisation ».
Remarque : en chauffant trop fort ou trop longtemps, des réactions secondaires peuvent se produire. Lorsqu'on détermine p.ex. l'eau de cristallisation du sulfate de cuivre (II), il peut se former de l'oxyde de cuivre (II) à partir du sel anhydre, par élimination de trioxyde de soufre, ce qui se traduit par une coloration foncée du produit blanc :

$$CuSO_4 \text{ (anhydre)} \xrightarrow{\text{chauffage}} CuO + SO_3$$

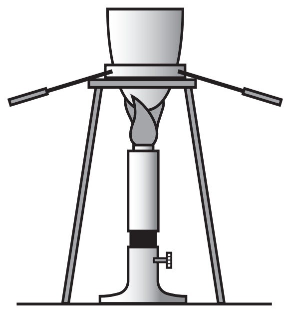
Cette réaction secondaire fait que le poids du produit de réaction est plus faible, et donc que la perte d'eau apparente est plus grande, ce qui, lors du calcul, fait apparaitre davantage d'eau de cristallisation qu'il y en a effectivement.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,01 g), creuset en porcelaine avec couvercle, trépied, bec Bunsen, triangle de terre cuite (taille adéquate pour le creuset), pince à creuset, tige de verre, sels cristallisés tels que sulfate de cuivre, alun, gypse, etc.

Mode opératoire

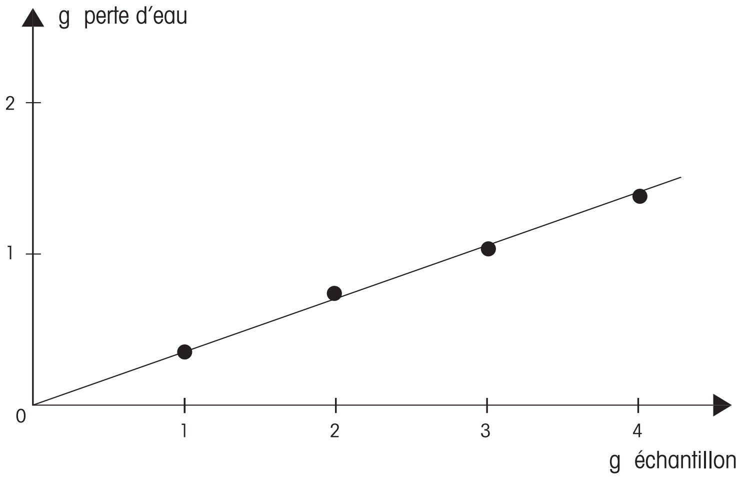
1. Peser le creuset vide avec son couvercle.
2. Doser env. 1 g de sel cristallisé dans le creuset et peser exactement.
3. Chauffer le creuset sur petite flamme non éclairante. Maintenir le creuset ouvert à l'aide de la pince à creuset et bien mélanger à l'aide de la tige de verre.
4. Lorsque le sel est déshydraté, ce qui s'observe par le changement de coloration pour le sulfate de cuivre ou par la fin de la réaction (pas de production de vapeur, pas de formation de cratères), couvrir le creuset et le laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.
5. Peser à nouveau après refroidissement du creuset.
6. Répéter l'essai avec des échantillons de 2, 3 et 4 g.



Montage expérimental

Résultats et exploitation

1. Calculer la perte d'eau en g à partir du poids exact de l'échantillon et du poids du résidu.
2. Représenter graphiquement la perte d'eau en fonction du poids d'échantillon. Les points de mesure devraient tomber sur une droite passant par l'origine des coordonnées, moyennant une certaine dispersion. Ceci permet en même temps de vérifier la précision des mesures.



3. De l'équation de la réaction et des rapports stœchiométriques

sel hydraté	→	sel anhydre	+	eau
a = … g		b = … g		c = … g
(échantillon)		(résidu)		(perte d'eau)

on tire le nombre x de molécules d'eau liées (eau de cristallisation) :

$$x = \frac{c \cdot MM_{sel}}{(a-c) \cdot 18} = \frac{(a-b) \cdot MM_{sel}}{b \cdot 18}$$

où MM_{sel} représente la masse molaire du sel anhydre.

4. Calculer x pour chaque essai et comparer aux données de la littérature.

Exemple chiffré Les valeurs suivantes ont été trouvées lors d'un essai avec du sulfate de cuivre (II) cristallisé :

poids de l'échantillon de sel : a = 2.48 g; résidu : b = 1.57 g
perte d'eau : c = (a–b) g = 0.91 g

$$x = \frac{0.91 \cdot 159.5}{1.57 \cdot 18} = 5.14$$

Le sulfate de cuivre cristallise donc avec 5 molécules d'eau; formule : $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$.

Thermolyse de sels

Théorie

On désigne par thermolyse, la décomposition d'un corps sous l'effet de la chaleur (décomposition thermique). Les thermolyses peuvent se dérouler de manière incontrôlée et violente ou encore, aux hautes températures nécessaires à la thermolyse, il peut se produire des réactions secondaires ou parallèles qui rendent une exploitation stœchiométrique compliquée, voire impossible. Pour des études stœchiométriques on utilise préférentiellement des substances qui se décomposent quantitativement lors d'un chauffage modéré. Les instructions expérimentales suivantes ont été testées sur deux substances modèles, l'hydrogénocarbonate de sodium et le carbonate de magnésium. Pour des raisons écologiques et de sécurité, nous avons renoncé à l'expérience « historique » de thermolyse avec l'oxyde de mercure (II).

Par thermolyse de l'hydrogénocarbonate de sodium, il se forme du carbonate de sodium (carbonate de soude) avec élimination d'eau et départ de dioxyde de carbone :

$$2\ NaHCO_3 \xrightarrow{\Delta T} Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

Ce procédé joue un rôle important dans la fabrication du carbonate de soude.
Au cours de la thermolyse de carbonate de magnésium, il y a départ de dioxyde de carbone :

$$MgCO_3 \xrightarrow{\Delta T} MgO + CO_2$$

Cette réaction se déroule de manière analogue à celle de la préparation de chaux vive à partir du carbonate de calcium :

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta T} CaO + CO_2$$

La thermolyse du carbonate de magnésium constitue par conséquent une réaction modèle de la calcination du calcaire pour la production de ciment. La décomposition de $MgCO_3$ en oxyde s'effectue cependant à plus basse température, de sorte que cette réaction est mieux adaptée à la démonstration dans un laboratoire d'enseignement.

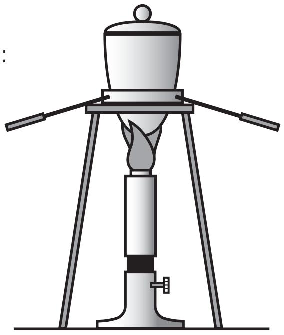
Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0.01 g), trépied, bec Bunsen, triangle de terre cuite, creuset en porcelaine (si possible plusieurs exemplaires), pince à creuset, carbonate de magnésium, hydrogénocarbonate de sodium (anhydre).

Mode opératoire

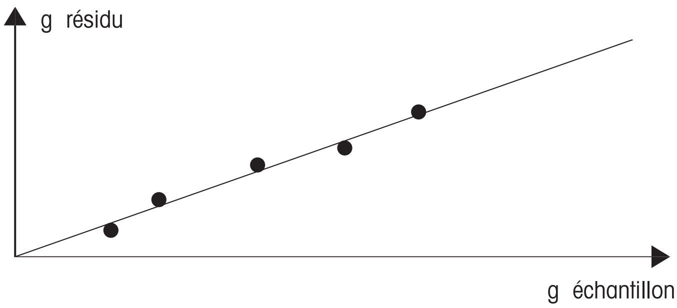
1. Peser le creuset vide, y doser env. 0.5 g de carbonate de magnésium ou d'hydrogénocarbonate de sodium et peser à nouveau.
2. Chauffer alors avec précaution le creuset sur flamme non éclairante. De la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone sont libérés et s'échappent du mélange réactif, ce qu'on peut constater à la formation de cratères. Il faut chauffer l'échantillon avec précaution, au début, afin d'éviter des pertes de matière par projections, sous l'effet du dégagement de gaz.
3. Lorsque la réaction se ralentit, ce qui se manifeste par un moindre dégagement de gaz, on chauffe violemment au rouge. Arrêter le chauffage lorsqu'on n'observe plus de dégagement gazeux.
4. Laisser refroidir jusqu'à la température ambiante puis peser le creuset contenant le produit de réaction.
5. Répéter l'essai avec des échantillons de 1 g, 1.5 g, 2 g et 2.5 g.

Montage expérimental :



Résultats et exploitation

1. Porter sur un graphique les poids des résidus en fonction des poids d'échantillon. Les points de mesure se situent sur une droite qui passe par l'origine des coordonnées:



2. Calculer la valeur théorique sur la base de l'équation de la réaction et du rapport stœchiométrique pour une quantité d'échantillon donnée, p.ex. pour une prise d'hydrogénocarbonate de sodium de 1.000 g :

$$2\ NaHCO_3 \xrightarrow{\Delta T} Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O$$
$$2 \cdot 84\ g/mol \qquad\qquad 106\ g/mol$$

1.00 g d'hydrogénocarbonate de sodium donne donc théoriquement

$$\frac{106}{168}\ g = 0.631\ g \text{ de carbonate de sodium.}$$

Et pour le carbonate de magnésium, nous avons :

$$MgCO_3 \xrightarrow{\Delta T} MgO + CO_2$$
$$84.31\ g/mol \qquad 40.31\ g/mol$$

c'est-à-dire que 1.000 g de carbonate de magnésium donne

$$\frac{40.31}{84.31}\ g = 0.478\ g \text{ d'oxyde de magnésium.}$$

3. Comparer les valeurs trouvées expérimentalement aux valeurs théoriques obtenues par le calcul.

Synthèse de sulfure de cuivre

Théorie

Lorsqu' un métal comme le cuivre, réagit avec un métalloïde comme p.ex. le soufre, il se forme un produit salin. Le rapport du métal au métalloïde lié chimiquement reste constant, indépendamment de la quantité de cuivre utilisé (loi des proportions constantes). Cette loi doit être confirmée par la présente expérience qu'on a avantage à répéter plusieurs fois et à titre d'exercice pour les élèves. Il s'agit, d'autre part, de déterminer la formule brute du composé synthétisé. La loi des proportions constantes ne s'applique cependant que lorsque le produit qui se forme est homogène, c'est-à-dire, lorsqu'il se présente par exemple sous la même forme cristalline, ce qui n'est pas le cas ici (le sulfure de cuivre est un composé non stœchiométrique). Cette expérience est malgré tout précieuse d'un point de vue pédagogique. La synthèse se fait à partir du métal cuivre et du métalloïde soufre. Il se forme du sulfure de cuivre :

cuivre + soufre → sulfure de cuivre

$$Cu + S \rightarrow CuS$$

La synthèse est réalisée avec une quantité exactement connue de cuivre et un excès de soufre, afin d'être sûr que tout le cuivre réagit avec le soufre. Dès que le soufre a fondu, il réagit immédiatement avec le cuivre. L'excès de soufre se sublime ou brûle en donnant du SO2 libéré sous forme de gaz :

soufre + oxygène → dioxyde de soufre

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Le dioxyde de soufre est toxique. Il faut donc travailler sous une hotte. La réaction s'effectue dans un creuset en porcelaine. Après la pesée du résidu, on détermine le rapport du cuivre mis en oeuvre et du soufre combiné, le pourcentage des éléments du composé et la formule brute.

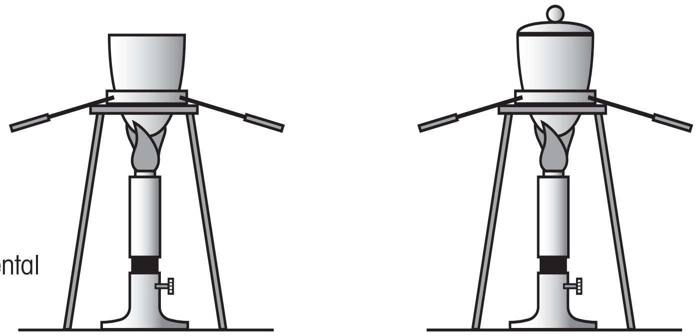
Faire au moins trois essais, si possible de nombreux essais indépendants les uns des autres. Une représentation graphique augmente la précision de l'exploitation.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0.01 g), trépied, bec Bunsen, creuset en porcelaine avec couvercle, pince à creuset, triangle de terre cuite, tôle de cuivre, fleur de soufre.

Mode opératoire

1. Découper des morceaux d'env. 0.5 g, 1 g, 1.5 g et 2 g dans une tôle de cuivre et les peser au mg près.
2. Découper chaque morceau de cuivre en portions d'environ 1.5 cm x 1.5 cm. Les mettre dans le creuset vide pesé avec son couvercle. Ajouter de la fleur de soufre en léger excès et chauffer sur une petite flamme non éclairante, sur le trépied, sous la hotte.
3. Lorsque l'excès de soufre est complètement éliminé, ce qu'on constate à l'absence de flamme ou de vapeurs jaunes-brunes de soufre, poser le couvercle sur le creuset et chauffer fortement pendant 2 minutes.
4. Couper le bec Bunsen, laisser refroidir le creuset jusqu'à la température ambiante (à l'air) et le peser.



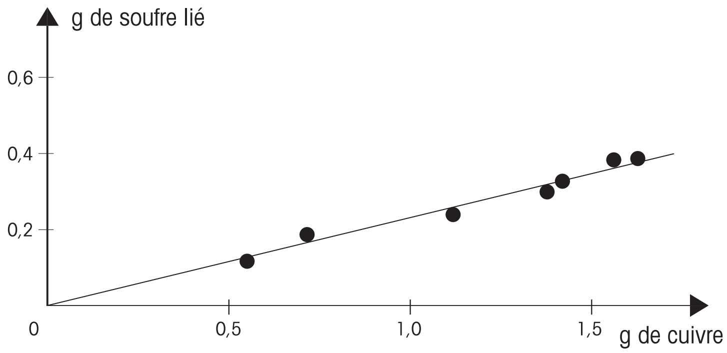
creuset sans couvercle au début et en cours de réaction

creuset avec couvercle après la réaction, pour chauffer, refroidir et peser

Résultats et exploitation

Les valeurs suivantes ont été trouvées lors d'exercices faits par des élèves :

Mesure	A g de cuivre	B g de soufre (lié)	Cuivre en %	Soufre en %	a : b
1	1.162	0.282	80.47	19.53	4.12
2	1.450	0.370	79.67	20.33	3.92
3	0.745	0.203	78.58	21.45	3.67
4	1.715	0.436	79.73	20.27	3.93
5	1.631	0.441	78.72	21.28	3.70
6	0.585	0.166	77.90	22.10	3.52
7	1.408	0.343	80.41	19.59	4.10
	1.242	0.320	79.51	20.49	3.88



Les résultats ci-dessus montrent clairement que le cuivre réagit en proportions constantes avec le soufre, indépendamment de la quantité utilisée au départ. La série de mesures montre en outre que les mesures individuelles présentent une certaine dispersion, mais que l'ensemble de la série donne un résultat indiscutable. Les points de mesure se répartissent sur une droite passant par l'origine.

Pour le calcul de la formule brute on part des valeurs :

Cu: 79.51 % : 63.54 g/mol → 1.251 → 2
S: 20.49 % : 32.06 g/mol → 0.629 → 1

} formule brute : Cu_2S

Détermination de la masse molaire d'un gaz liquéfié

Théorie

Pour déterminer la masse molaire d'un gaz, on évacue un volume donné, par exemple celui d'un ballon d'un litre à robinet latéral, puis on le remplit du gaz en question et on détermine la masse de ce volume de gaz. En ramenant le volume aux conditions normales (température T = 273 K; pression p = 1013 mbar) on obtient le volume du gaz sous les conditions normales. Conformément à la loi générale sur les gaz, 1 mole de n'importe quel gaz occupe, sous les conditions normales, un volume de 22.4 dm3. Il est alors facile de calculer la masse molaire.
Dans les expériences présentes, il ne s'agit pas de déterminer la masse molaire d'un gaz quelconque mais celle d'un gaz liquéfié. Comme gaz liquéfié nous utilisons le butane en ampoules qu'on trouve partout dans le commerce. Ces ampoules servent à recharger les briquets. L'expérience illustre d'une part la méthode de détermination de la masse molaire et sert d'autre part d'introduction à la stœchiométrie et aux lois sur les gaz.

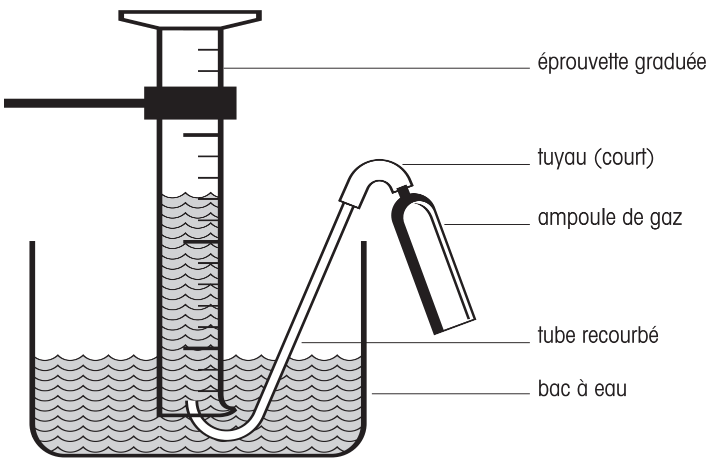
Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0.01 g), bac à eau avec éprouvette graduée de 1 litre pour recueillir le gaz, tuyau fin, tube recourbé, pipette à piston 100 ml ou 200 ml, statif, pince, baromètre, thermomètre, ampoule de gaz liquéfié.

Mode opératoire

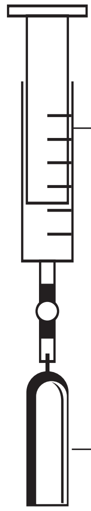
Mesures à l'aide du bac à eau

1. Remplir d'eau le récipient qui doit recevoir le gaz (ici une éprouvette graduée de 1 litre), le fermer par un bouchon en caoutchouc et le renverser dans le bac à eau, ouverture vers le bas.
2. Ouvrir l'éprouvette graduée sous l'eau. Il ne doit pas pénétrer d'air dans l'éprouvette graduée.
3. Fixer l'éprouvette graduée au statif de manière à ménager un espace d'env. 1 cm entre son bord d'ouverture et le fond du bac.
4. Peser l'ampoule de gaz.
5. A l'aide du tube recourbé, raccordé à l'ampoule de gaz par un tuyau fin, amener env. 800 – 900 ml de gaz dans l'éprouvette graduée.
6. Comme le gaz se détend à la sortie de l'ampoule, il se refroidit avant de revenir à la température ambiante. Avant de lire le volume de gaz final, il faut attendre environ 5 minutes.
7. Peser à nouveau l'ampoule pendant ce temps.
8. Calculer la quantité de gaz contenue dans l'éprouvette graduée.



Mesures avec la pipette à piston

1. Fixer une pipette à piston 100 ml ou 200 ml sur le statif de manière à ce que le gaz puisse être aisément amené de l'ampoule dans la pointe de la pipette.
2. Peser l'ampoule, amener env. 100 ou 200 ml de gaz dans la pipette à piston et lire immédiatement le volume (les défauts d'étanchéité de la pipette à piston se répercutent davantage sur les résultats que la petite erreur due au refroidissement du gaz, occasionné par la détente à sa sortie de l'ampoule !).
3. Peser à nouveau l'ampoule et calculer la quantité de gaz introduite.



Résultats et exploitation

Au cours d'une expérience effectuée à l'aide du bac à eau, 1.908 g de gaz ont été introduits. Le volume mesuré était de 830 ml à 20.5 °C sous une pression de 988 mbar.

Le volume calculé pour les conditions normales est de

$$V_o = \frac{V_{exp.} \cdot p_{exp.} \cdot T_o}{p_o \cdot T_{exp.}} = \frac{830 \text{ ml} \cdot 988 \text{ mbar} \cdot 273 \text{ K}}{1013 \text{ mbar} \cdot 293.5 \text{ K}} = \underline{753 \text{ ml}}$$

753 ml ≙ 0,753 dm^3 contiennent donc 1.908 g de gaz.

22.4 dm^3 contiennent par conséquent $\frac{1.908 \cdot 22.4}{0.753}$ g = $\underline{56.8 \text{ g}}$

La masse molaire du gaz, déterminée expérimentalement, est donc de 56.8 g/mol. La valeur obtenue par le calcul pour le butane (C_4H_{10}) est de 58 g/mol. Le résultat de la mesure est étonnamment bon, étant donné qu'il n'a pas été tenu compte du volume du bout de tuyau et du tube recourbé. Il est vrai que le fait que le gaz était « humide », c'est-à-dire, que la mesure a eu lieu en atmosphère de vapeur d'eau, a été négligé lors de l'exploitation.
On doit aussi considérer que la précision de l'éprouvette graduée ainsi que de la seringue n'est pas exacte. On peut cependant augmenter la précision de la détermination de la masse molaire en utilisant un ballon en verre comparable à celui utilisé pour l'expérience de la « densité de l'air ». Le volume du ballon peut être déterminé en pesant la quantité d'eau qu'il peut contenir.
L'exploitation des résultats obtenus avec la pipette à piston a été effectuée de manière analogue. Cette mesure était également assez précise puisque des valeurs de 60,5 et 60,9 g/mol ont été trouvées. Il n'est pas tenu compte de la pression exercée par le piston de verre sur le gaz.

Vitesse d’évaporation

Théorie

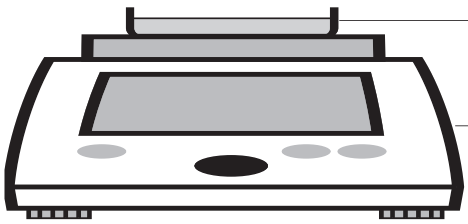
L'évaporation des liquides et des solides volatils est un phénomène qui est à mettre en relation avec l'agitation thermique, et donc, avec l'énergie cinétique des molécules. La vitesse d'évaporation dépend de plusieurs facteurs, en première ligne de la température ambiante, de la pression et des forces intermoléculaires entre les différentes molécules. La masse molaire et la forme des molécules, qui influence à son tour les forces intermoléculaires, jouent également un rôle. L'évaporation et sa vitesse peuvent être aisément observées et mesurées à l'aide d'une balance.

Matériel

Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0,001 g), 1 grande boite de Pétri (diamètre 8 – 12 cm), divers liquides comme p.ex. de l'acétone, de l'éthanol, de l'hexane, etc.

Mode opératoire

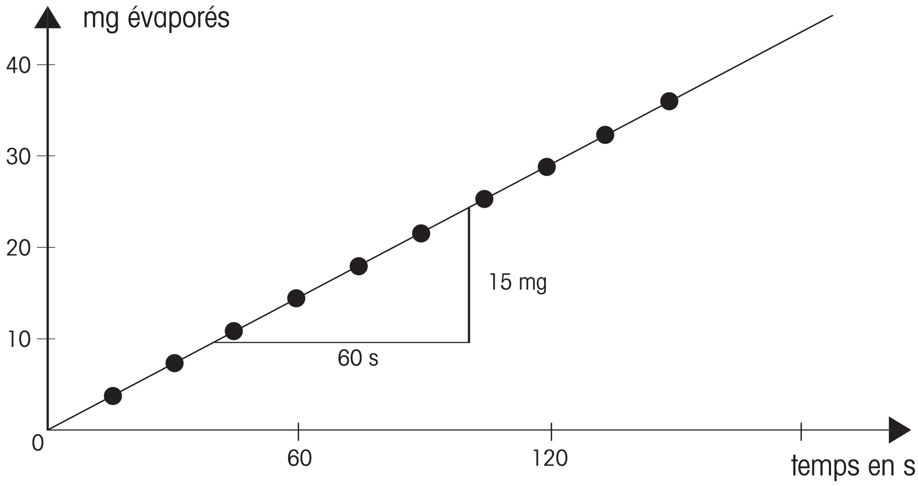
Poser la boite de Pétri sur la balance, y verser le liquide à étudier (env. 5 mm de hauteur) , tarer et lire toutes les 15 secondes la masse évaporée. Interrompre la mesure après 3 minutes. Important: utiliser la même boite de Pétri pour toutes les mesures, afin de garder la surface d'évaporation constante.
La lumière directe du soleil devra aussi être éviter.



Résultats et exploitation

1. Présenter graphiquement les valeurs de mesure sur papier millimétré. Porter la quantité de liquide évaporée en fonction du temps. Les valeurs suivantes ont été trouvées lors d'une mesure avec une boite de Pétri de 9 cm de diamètre et de l'acétone à 21°C :

temps :	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	s
quantité :	0	4	8	12	15	19	22	26	30	33	37	mg



Les vitesses d'évaporation de l'éthanol, de l'acétate d'éthyle et de l'acétate de butyle ont été déterminées de la même manière. Les valeurs suivantes ont été trouvées :

acétone :	15.0 mg par minute	pt.d'éb.: 56 °C
éthanol :	3.7 mg par minute	pt.d'éb.: 78 °C
acétate d'éthyle :	6.5 mg par minute	pt.d'éb.: 77 °C
acétate de butyle :	1.7 mg par minute	pt.d'éb.: 126 °C

Interprétation L'interprétation de ces résultats est difficile car les facteurs évoqués dans la partie théorique interviennent de manière différente. Tentons tout de même de les interpréter :

1. L'acétone présente la plus grande vitesse d'évaporation. Les forces intermoléculaires sont sans doute faibles, ce qui se traduit également par le point d'ébullition bas. Ces forces sont en tout cas plus faibles pour l'acétone que pour l'éthanol car l'éthanol peut établir des liaisons hydrogène entre ses molécules, ce qui ralentit l'évaporation.
2. L'évaporation de l'éthanol est plus lente que celle de l'acétate d'éthyle, bien que la masse molaire de l'éthanol est plus faible et que sa température d'ébullition est presque identique. A nouveau ce sont vraisemblablement les liaisons hydrogène à la surface de l'éthanol qui retiennent" les molécules en train de s'évaporer, ce qui n'est pas le cas pour l'acétate d'éthyle. Seules les forces de Van der Waals, beaucoup plus faibles, se manifestent dans l'acétate d'éthyle.
3. La vitesse d'évaporation de l'acétate d'éthyle est plus grande que celle de l'acétate de butyle. Ceci est en corrélation avec les points d'ébullition et les masses molaires, ainsi qu'avec la taille des molécules. La faible vitesse d'évaporation de l'acétate de butyle est probablement due aux forces de Van der Waals plus grandes.

Catalyse homogène : la décomposition de H_2O_2

Théorie Un catalyseur est une substance qui déclenche une réactioin ou l'accélère, sans être elle-même consommée au cours de la réaction. L'effet d'accélération du catalyseur repose sur un abaissement de l'énergie d'activation de la réaction en cause.
Lorsque le catalyseur est présent dans une autre phase que les substances participant à la réaction, on parle de catalyse hétérogène. Si par contre le catalyseur est présent dans la même phase que les substances réagissantes, il s'agit d'une catalyse homogène.
La décomposition de H_2O_2 s'effectue selon l'équation :

$$2\ H_2O_2 \xrightarrow{\text{catalyseur}} 2\,H_2O + O_2$$

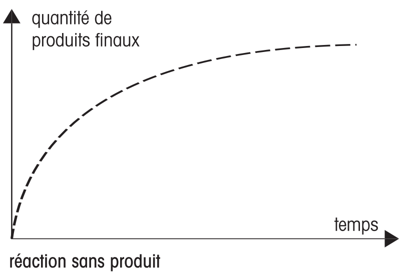
La catalyse peut être aussi bien homogène qu'hétérogène. Comme catalyseurs hétérogènes on peut employer de l'argent ou de l'oxyde de manganèse (IV) (MnO_2), comme catalyseurs homogènes on peut utiliser p.ex. une solution d'iodure de potassium ou une solution de l'enzyme catalase. A l'aide des mesures suivantes, nous allons étudier la catalyse homogène de la réaction par une solution d'iodure de potassium et l'oxygène libéré sera mesuré en fonction du temps. En variant la quantité de catalyseur, on peut constater comment le catalyseur influence la réaction. On peut en outre constater comment la réaction s'effectue. En effet, si la réaction se fait en une étape, selon le schéma :

R (réactifs) → P (produits)

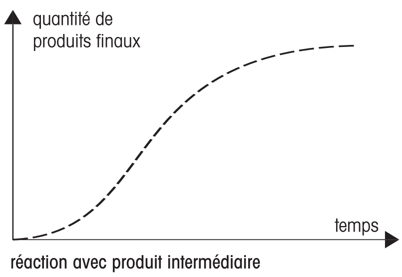
alors la formation d'oxygène débute immédiatement après addition du catalyseur. Mais si la réaction se déroule en deux étapes, en passant par un produit intermédiaire, selon le modèle suivant :

R (réactifs) → I (produits intermédiaires) → F (produits finaux)

alors la formation d'oxygène ne commence qu'après un certain délai, dit « phase initiale ».
Cette différence entre les deux types de réaction se traduit également par la forme de la courbe, obtenue en portant la masse de l'oxygène libéré en fonction du temps :



réaction sans produit



réaction avec produit intermédiaire

Pour ces expériences, la balance n'est pas seulement instrument de pesée, elle assure également la fonction d'un instrument de mesure permettant d'observer le déroulement de la réaction. Les résultats peuvent bien sûr être exploités également sur un ordinateur Lorsqu'on dispose d'un afficheur pour rétroprojecteur METTLER, la série de mesures peut aussi être effectuée à titre de démonstration, en salle de cours, et être aisément exploitée et interprétée avec les élèves.

Matériel Balance de précision METTLER TOLEDO (précision d'affichage 0.01 g, avec afficheur pour rétroprojecteur (pour la démonstration en salle de cours), 1 bécher 250 ml, seringue ou pipette graduée 0–10 ml, tige de verre, 500 ml d'une solution fraîchement préparée à 1% de H_2O_2, solution sat. de KI, un chronomètre, papier millimétré pour l'exploitation.

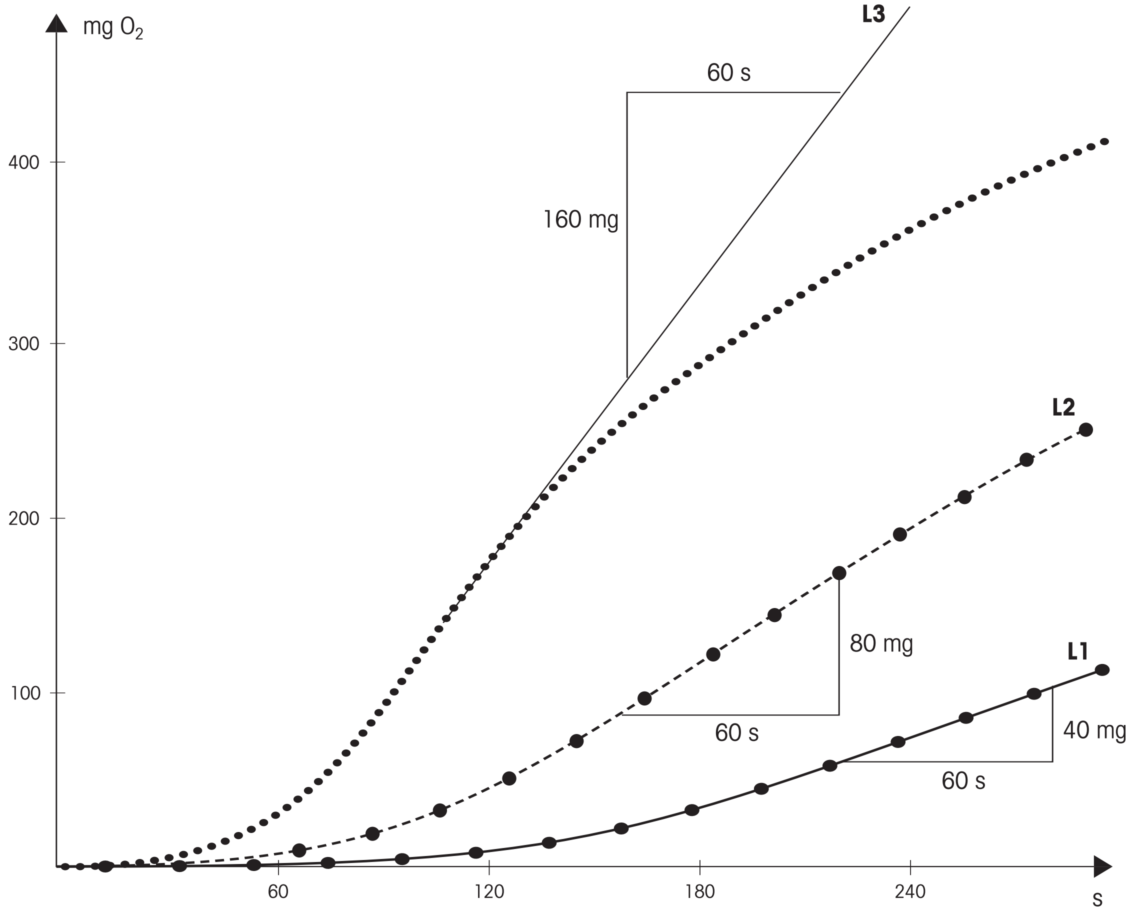
Mode opératoire

1. Tarer le bécher sur la balance.
2. Verser 100 g de solution à 1% de H_2O_2 dans le bêcher.
3. Ajouter 2.0 ml de solution sat. de KI, agiter brièvement avec la tige de verre et tarer à nouveau.
4. Lire toutes les 15 secondes la perte de masse due au départ d'oxygène et noter les valeurs mesurées. La mesure peut être interrompue au bout de 5 – 6 minutes.
5. Effectuer d'autres séries de mesures avec 4.0 ml et 8.0 ml de solution sat. de KI. Si nécessaire, des mesures supplémentaires peuvent également être effectuées avec 3.0 ml, 6.0 ml et 9.0 ml de solution sat. de KI. Ne pas utiliser de plus grandes quantités de catalyseur, sinon il faudrait procéder, par le calcul, à une correction de l'effet de dilution, en raison de l'augmentation du volume total de la solution de réaction. Pour les quantités de catalyseur indiquées, une correction de l'effet de dilution n'est pas nécessaire.
6. Représenter graphiquement les valeurs de masse trouvées en fonction du temps.

Remarque : lorsque, en raison du temps disponible (p.ex. en cas de mesures effectuées à titre de démonstration), une réaction plus rapide est souhaitée, toute la série de mesures peut être effectuée avec 50 ml de H_2O_2 3% et 0.75 ml ou 1.5 ml ou 3.0 ml de solution sat. de KI comme catalyseur. Les valeurs de mesure sont alors quelque peu faussées, parce que les solutions s'échauffent légèrement par suite de la réaction exothermique. Elles sont cependant encore suffisamment précises pour une exploitation.

Résultats et exploitation Une série de mesures, avec chaque fois 100 ml de solution à 1% de H_2O_2 fraîchement préparée et 2,0 ml ou 4,0 ml ou 8,0 ml de solution sat. de KI a livré, à la température T = 21 °C, les valeurs suivantes :

temps en secondes	masse d'oxygène formée en mg avec 2.0 ml KI	avec 4.0 ml KI	avec 8.0 ml KI
0	0	0	0
15	1	1	1
30	3	3	3
45	5	5	9
60	7	7	25
75	8	12	58
90	12	20	97
105	14	27	137
120	17	41	174
135	21	60	209
150	27	78	238
165	31	98	265
180	38	119	288
195	45	138	310
210	55	159	330
225	65	176	349
240	75	194	364
255	86	215	381
270	95	232	397
285	105	247	407
300	114	262	416



Interprétation Les résultats des mesures et la représentation graphique ci-dessus permettent de faire les déductions suivantes :

1. La réaction étudiée ne s'effectue pas en une, mais en deux étapes, selon le schéma : R (réactifs) → In (produit intermédiaire) → F (produits finaux)
2. La vitesse de réaction obtenue en déterminant la pente des droites L1, L2, L3 au point d'inflexion des courbes correspondantes est proportionnelle à la quantité de catalyseur.

   Droite L1 : vitesse de réaction $v_1 \approx$ 40 mg O_2 par minute
   Droite L2 : vitesse de réaction $v_2 \approx$ 80 mg O_2 par minute
   Droite L3 : vitesse de réaction $v_3 \approx$ 120 mg O_2 par minute

   Un comportement analogue s'observe souvent dans les réactions enzymatiques. La présente réaction peut servir de modèle pour de telles réactions.
3. Lorsqu'on réduit la concentration de catalyseur, non seulement la vitesse de réaction devient plus lente mais le temps nécessaire à la formation d'oxygène augmente aussi. La phase initiale de la réaction s'allonge nettement.

Le déroulement de la réaction livre une explication à ce phénomène :
Au cours de la première étape, les ions iodure et H_2O_2 réagissent pour former des ions hypoiodite :

$$I^- + H_2O_2 \rightarrow IO^- + H_2O,$$

qui réagissent ensuite avec une deuxième molécule d' H_2O_2, pour donner de l'eau, de l'oxygène et des ions iodure :

$$IO^- + H_2O_2 \rightarrow I^- + H_2O + O_2.$$

Les ions iodure, apparaissant dans la seconde étape de la réaction, sont de nouveau disponibles pour la première étape. Comme les deux étapes se déroulent beaucoup plus rapidement que la réaction globale sans addition d'iodure, les ions iodure exercent une action catalytique, par la formation du produit intermédiaire IO^- (hypoiodite). Ils abaissent l'énergie d'activation de la décomposition de H_2O_2 en eau et oxygène.

Remarque Parallèlement aux réactions évoquées jusqu'ici, a lieu une autre réaction, du moins immédiatement après addition de l'iodure, mais cette réaction atteint rapidement l'équilibre et par conséquent s'arrête. L'oxygène naissant oxyde l'iodure en iode élémentaire :

$$2\ H_3O^+ + 2\ I^- + [O] \rightleftarrows 3\ H_2O + I_2$$

La formation de l'élément iode est reconnaissable à la coloration jaune du mélange réactionnel. Les ions H_3O^+ proviennent de l'eau :

$$2\ H_2O \rightleftarrows H_3O^+ + OH^-$$

comme les ions H_3O^+ sont « consommés » lors de la formation d'iodure, leur concentration diminue rapidement de sorte que la formation d'iode s'arrête, après atteinte de la concentration d'équilibre. Cette réaction parallèle n'influence pas l'exploitation des résultats de mesure.

Transpiration chez les plantes

Buts
- Preuve de la transpiration par les feuilles
- Différence de transpiration en fonction de l'écotype de la plante et des facteurs d'environnement
- Transpiration en fonction du degré d'ouverture des stomates

Matériel
Balance de précision METTLER TOLEDO à précision d'affichage d'au moins 0,01 g
Fiole d'Erlenmeyer à col étroit, 100 ml ou 200 ml
Bouchon perforé
Ouate
Huile de paraffine (éventuellement teintée par un colorant lipophile)
Lampe de bureau
Séchoir à cheveux
Pour les balances très sensibles et lorsque les intervalles entre les mesures doivent être courts, il est recommandé de construire un caisson en plexiglas (on peut se procurer le plexiglas dans le commerce, découpé aux dimensions voulues, puis l'assembler sans difficulté, à l'aide d'une colle adéquate).
Plantes : très grand choix en été. Cependant choisir au moins une branche d'une plante à habitat chaud et sec et une autre d'une plante à habitat humide. Sont disponibles toute l'année dans les jardins et parcs:
If (d'autres conifères conviennent également)
Viornes à feuilles persistantes (Viburnum rhytidophyllum, V. fragrans)
Cotoneasters à feuillage persistant (p. ex. Cotoneaster salicifolia)
Laurier-cerise (Prunus laurocerasus, qui convient également très bien aux coupes minces en microscopie)
Houx
Laurier-rose

Montage expérimental
Remplir la fiole d'Erlenmeyer d'eau. Y placer le rameau fraîchement coupé. Déposer avec précaution un peu d'huile de paraffine à la surface de l'eau (afin d'empêcher l'évaporation directe). Un bouchon perforé, de l'ouate ou la combinaison des deux servent à maintenir de manière souple la branche en position verticale.

Mode opératoire
Peser la branche placée dans la fiole d'Erlenmeyer à intervalles adéquats selon la sensibilité de la balance et la taille et la nature de la branche) et établir un tableau de valeurs de mesure.

Exploitation
La perte de poids dépend avant tout de la surface foliaire, du temps et de l'humidité relative de l'air. C'est pourquoi il est sensé de calculer la quantité d'eau évaporée par cm^2 de surface foliaire et par minute. Pour ce faire, déterminer la surface foliaire comme suit :
étaler les feuilles sur un papier rigide et tracer leur contour au crayon. Puis découper les surfaces obtenues et les peser.
Peser également un échantillon du même papier, de 100 cm^2 de surface par exemple.

Exemple:

Branche de Pélargonium

temps	poids du récipient avec branche et eau	différence de poids
0 min	108.187 g	–
5 min	108.135 g	52 mg
65 min	107.585 g	550 mg

Poids de la surface foliaire sur papier: 2.927 g
Poids de l'échantillon de papier: 1.172 g (100 cm^2)

Surface foliaire en cm^2: $\frac{\text{poids de la surface foliaire sur papier}}{\text{poids de l'échantillon de papier}} \cdot 100 = 252\ cm^2$

Transpiration spécifique = perte de poids par cm^2 et par min

$$= \frac{\text{perte de poids}}{\text{temps en min} \cdot \text{surface foliaire}} = \frac{602}{65 \cdot 252}$$

$$= 0.0370\ mg/cm^{-2}/min^{-1}$$

Il est possible de simplifier les opérations en rapportant la perte d'eau à la masse végétale (quantité d'eau transpirée par g de poids frais et par minute). La comparaison entre diverses plantes est ainsi plus rapide.

Extension de l'expérience

Des rameaux entreposés à l'obscurité sont rapidement apportés sur la balance: la transpiration augmente avec l'ouverture des stomates.
Déterminer la transpiration spécifique de diverses plantes.
On peut combiner cette expérience avec des coupes de microscopie transversales de feuilles.
Pour une même plante on peut modifier les facteurs d'environnement: air humide (cloche de verre tapissée de papier de soie mouillé ou le caisson de protection évoqué plus haut fermé par un couvercle)
air sec (ambiant)
air chaud (lampe chauffante)
air agité (séchoir à cheveux)

Remarques

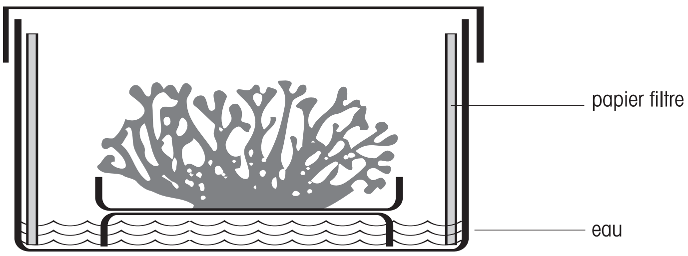
Placer les branches dans l'eau dès qu'elles sont coupées, les retailler éventuellement sous l'eau. Récolter des branches de plantes bien approvisionnées en eau, sinon elles commencent par absorber de l'eau mais ne transpirent d'abord pas, leurs stomates étant encore fermés.
La perte de poids est alors très faible. On peut éviter ces difficultés en mettant les plantes dans l'eau quelques heures avant le début de l'expérience.

Absorption de vapeur d'eau par les lichens

Buts Cette expérience doit montrer comment des plantes peuvent absorber de l'eau à partir d'une atmosphère humide. Elle vise de plus à expliquer pourquoi les arbres des zones (non polluées) à air humide et de brouillard portent une épaisse couche de lichens.

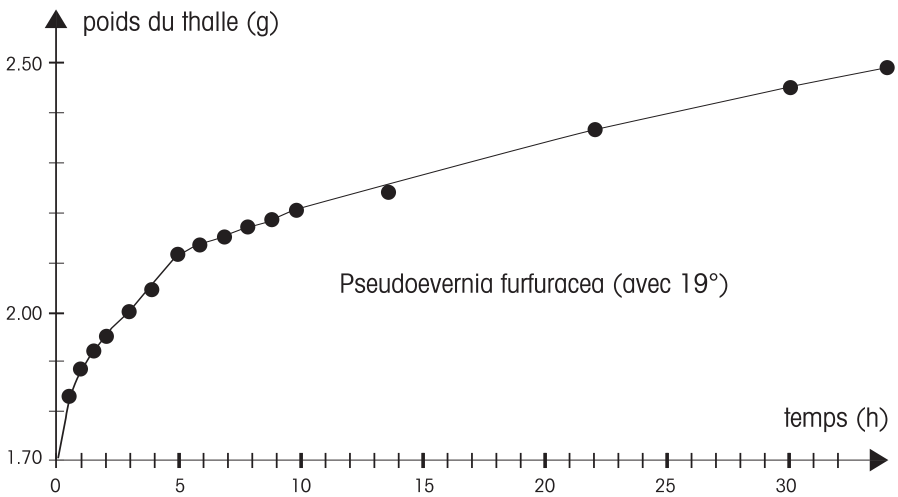
Matériel
– Balance de précision METTLER TOLEDO à précision (d'affichage d'au moins 0,01 g
– Boîte de Pétri (forme haute) de 12 cm de diamètre
– Boîte de Pétri ou couvercle en matière plastique d'environ 6 cm de diamètre
– Papier filtre
– Lichens secs (p.ex. Pseudoevernia furfuracea, espèces des genres Cetraria et Stereocaulon)

Mode opératoire Préparer une chambre humide conformément au croquis.



Peser à présent exactement un thalle de lichen sec, de taille adéquate, le placer dans la chambre humide et fermer bien hermétiquement. Après une demi-heure peser à nouveau (travailler rapidement!). Replacer le thalle dans la chambre humide. Répéter les pesées par intervalles d'une demi-heure, plus tard par intervalles d'une heure jusqu'à ce qu'à ce que le poids devienne constant.

Exploitation Représenter graphiquement l'absorption d'eau en fonction du temps :



Dans la chambre humide, l'eau condense sur le thalle de lichen. Cette eau de condensation est rapidement absorbée par les cavités remplies d'air du thalle de lichen sec (forte pente de la courbe). Ensuite les parois des hyphes des champignons gonflent lentement jusqu'à saturation totale en eau (faible pente de la courbe). Par absorption d'eau, le thalle de lichen, d'abord fragile et cassant, devient souple et élastique.

Absorption et libération d'eau par les mousses

Buts L'absorption d'eau par les mousses à partir du sol est négligeable. L'eau est surtout absorbée à partir de la pluie, de la rosée, du brouillard et de la vapeur d'eau. Les expériences montrent les importantes quantités d'eau que retiennent les mousses et le rôle considérable qu'elles jouent ainsi dans divers écosystèmes. Les expériences servent également de bonne introduction à l'anatomie et la physiologie des mousses. La comparaison du budget eau des mousses et des plantes vasculaires est éloquent.

Matériel
- Balance de précision METTLER TOLEDO à précision d'affichage d'au moins 0,01 g
- Cristallisoir
- Papier absorbant
- Diverses mousses (p. ex. Polytrichum, Leucobryum, Sphagnum)

Mode opératoire Peser un coussin de mousses sec puis l'immerger complètement dans un cristallisoir remplie d'eau. Ensuite, d'abord à intervalles courts puis plus longs, retirer le coussin de mousses de l'eau, le secouer brièvement pour éliminer l'eau retenue superficiellement, le tamponner légèrement à l'aide de papier absorbant et peser. Lorsque le poids reste constant, l'absorption maximale d'eau est atteinte.

Exploitation Par exemple selon le schéma suivant :

Plante	temps en minute	pois en g	absorption d'eau en %
Polytrichum commune	0	1,46	0
	30	2,42	165
	60	4,60	315
	90	5,32	364
	120	5,48	375
Sphagnum spec.	0	2,24	0
	5	51,02	2280
	10	59,07	2640
	15	64,29	2870
	30	65,80	2940
	60	71,80	3170

Dans les conditions du laboratoire on observe des valeurs extrêmes. Dans la nature, la rétention maximale d'eau n'est obtenue que passagèrement, lors de pluies importantes.
A cette occasion, on ne devrait pas manquer de présenter sous le microscope les cellules aquifères de Sphagnum et de Leucobryum. Voir également STEINECKE et AUGE (1963).

Développement On peut aussi mesurer la libération de l'eau de mousses saturées: les coussins de mousses sont posés sur une surface sèche et observés à intervalles de plusieurs heures (plusieurs jours). Les auteurs cités plus haut décrivent également des expériences de transport de l'eau par les mousses. A titre de comparaison, on peut aussi étudier, de manière analogue, l'absorption et la libération de l'eau par les champignons et les lichens.

Teneur en eau et en cendres de divers organes végétaux

Buts

Les expériences se prêtent bien à l'enseignement par groupes et visent les buts pédagogiques suivants :

– donner un aperçu de la composition des végétaux
– se familiariser avec les méthodes d'analyse
– illustrer les notions de poids frais, poids sec, teneur en eau, en matière organique et minérale, teneur en cendres.

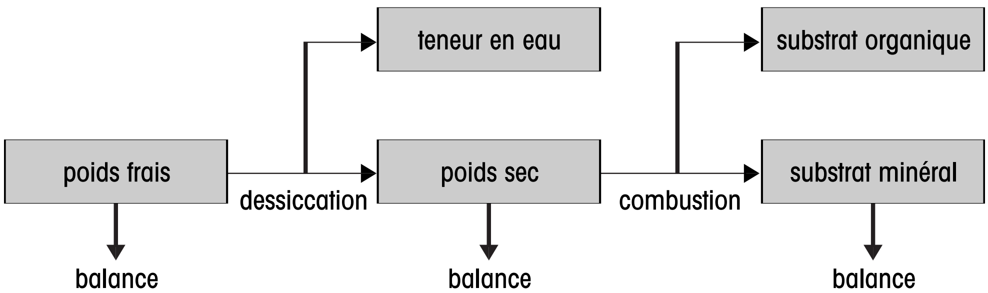
Les élèves devraient être familiers avec les connaissances suivantes : absorption d'eau et de sels minéraux, photosynthèse, respiration, connaissances de base en chimie.

Matériel

– Balance de précision METTLER TOLEDO à précision d'affichage d'au moins 0,01 g
– Boîtes de Pétri ou béchers
– Coupelles de porcelaine
– Bec de gaz avec trépied, triangle de terre cuite, tige de magnésie ou de verre, éventuellement un four à moufle
– Matériel végétal comme, p. ex., feuilles, oignons, racines, fruits.

Mode opératoire

La description suit le schéma suivant :



Peser le matériel végétal, qui doit être aussi frais que possible, et le porter rapidement à l'étuve. Sécher pendant 10 minutes à 105 °C (mort rapide des tissus afin d'éviter des pertes par respiration) puis à 80 °C, jusqu'à poids constant (1 – 2 jours). On ne sèche plus à température constante de 105 °C parce que diverses substances végétales (p.ex. les huiles essentielles) s'échappent à cette température ou subissent une décomposition thermique.
Déterminer à présent le poids sec.
Si l'on dispose d'un four à moufle, calciner le matériel végétal sec à 500 °C, sinon calciner dans une coupelle de porcelaine au-dessus d'un bec Bunsen, d'abord sur petite flamme puis sur flamme vive. Mélanger de temps à autre le matériel carbonisé. Afin de réduire les amas charbonneux, laisser refroidir, humecter à l'alcool, écraser les amas et chauffer à nouveau. Peser le résidu de cendres.

Exploitation Déterminer la teneur en eau d'après la formule: teneur en eau = poids frais – poids sec. La teneur en cendres est exprimée en % du poids frais et du poids sec. Le tableau suivant peut servir de modèle:

échantillon	poids frais en g	poids sec en g	teneur en eau		teneur en cendres			subst. organiques % PF
			en g	en %	en g	en % PS	en % PF	
laitue	18,28	1,21	17,07	93,9	0,02	1,7	0,11	6,51
pomme	15,80	2,74	13,06	82,6	0,04	1,5	0,25	17,10
grains de blé	10,00	9,25	0,75	7,5	0,18	1,9	1,80	90,70

Lorsque ces expériences sont effectuées en cours de travaux pratiques il faut absolument, lors de l'exploitation, discuter aussi des sources d'erreurs possibles.

Autres possibilités

- Analyse qualitative des cendres
- Etude de divers types de feuilles (caduques, persistantes, succulentes)
- Feuilles d'une espèce végétale exposées au soleil, à l'ombre, ou feuilles insérées très haut, exposées au vent ou bien protégées du vent.

La fermentation alcoolique

Buts et présentation du problème

La fermentation alcoolique s'accompagne d'un dégagement de dioxyde de carbone. Ainsi, le substrat de fermentation s'allège, ce qui est facilement démontré par pesée. La quantité de dioxyde de carbone libérée par unité de temps sert donc de mesure de l'intensité du métabolisme des levures, sous conditions extérieures maintenues constantes. En modifiant l'expérience de base on peut étudier l'influence de divers facteurs extérieurs sur l'intensité de la fermentation. Le principe fondamental reste toujours le même: on détermine le poids en fonction du temps, par pesées successives.
Connaissances nécessaires aux élèves : respiration et fermentation: déroulement, signification, aspects chimiques illustrés par les formules brutes. Lorsque les expériences sont effectuées en cours de travaux pratiques, les élèves peuvent eux-mêmes projeter et exécuter différentes séries d'essais. En classe, avec une durée de cours de 45 min seulement, la démonstration de l'influence de la température est parfaitement possible : grâce à une fiole d'Erlenmeyer dans la salle de cours, une autre dans l'étuve et une troisième dans le réfrigérateur. Il n'est cependant pas possible d'établir une courbe de fermentation complète dans ces conditions.

Matériel

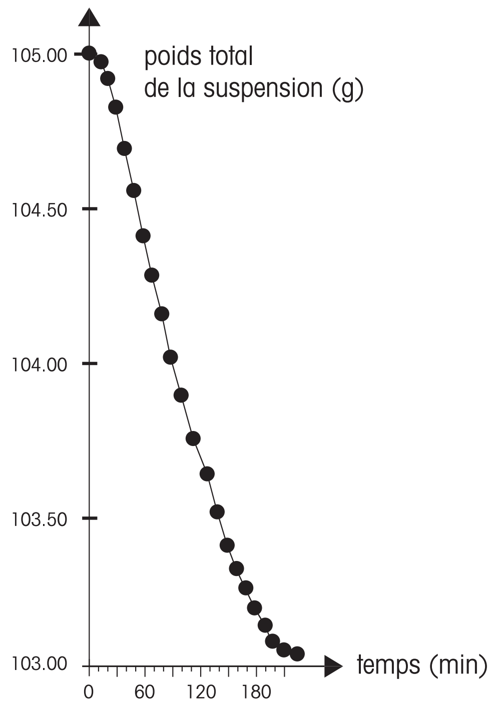
- Balance de précision METTLER TOLEDO avec précision d'affichage de 0,01 g
- Levure de boulanger
- Glucose
- Fiole d'Erlenmeyer de 100 ml avec bouchon perforé fermé par un léger tampon d'ouate
- Etuve et réfrigérateur ou, au besoin, bain-marie ou lampes chauffantes

Mode opératoire

Verser 90 ml d'eau de robinet dans la fiole d'Erlenmeyer et ajouter 10 g de levure de boulanger. En faire une suspension en mélangeant et en agitant. Juste avant le début de l'expérience et une fois que la suspension a atteint la température voulue, ajouter 5 g de glucose. Effectuer la première pesée (avec le bouchon) puis, la deuxième pesée 10 minutes plus tard, la troisième au bout de 20 minutes etc…
Après chaque pesée, il faut bien secouer la suspension.
Lorsqu'il s'agit d'établir des courbes de fermentation typiques en deux heures de cours, il est indispensable de travailler à la valeur de température optimale de 35 °C.
Il est important d'agiter soigneusement et de manière aussi reproductible que possible. Il faut agiter au moins une fois après chaque pesée. Lorsque l'expérience se déroule à température ambiante, il est recommandé d'utiliser un agitateur magnétique.

Exploitation

Elle se fait selon le modèle ci-dessous.
Les valeurs ont été déterminées à la température ambiante de 19 °C. Cette expérience montre donc l'intensité de fermentation qu'il est possible d'obtenir avec un minimum de moyens.



Après une phase initiale lente, la vitesse de réaction tend vers une constante puis ralentit avec la diminution de la teneur en sucre. La réaction ne s'arrête qu'au bout de quelques heures. A 35 °C, on peut obtenir une courbe en S faiblement incurvée en 90 minutes. On peut calculer, sur base stœchiométrique, quel doit être le rendement en CO_2 d'une certaine quantité de sucre (48.8 %). Dans notre exemple, 2.44 g de dioxyde de carbone auraient donc du être libérés (il faut cependant savoir que la masse de levure de boulanger contient une certaine proportion de substances fermentables).

Autres possibilités On peut déterminer l'intensité de la fermentation en fonction des facteurs suivants :

- la température p.ex. dans l'intervalle 0 à 60 °C, avec détermination de la température optimale. A cet endroit on peut également montrer que la vitesse de réaction double pratiquement tous les 10°.
- le nombre de cellules de levure ou la quantité d'enzyme : expériences avec des quantités différentes de levure, entre environ 2 et 20 g.
- la quantité de sucre:
  expériences avec, p. ex., 2.5, 5, 10 et 20 g.
- la nature du sucre
- le pH :
  préparer diverses solutions-tampons à l'aide de phosphate de sodium et de dihydrogénophosphate de sodium et déterminer leur pH. L'optimum se situe en milieu légèrement acide.
- l'agitation :
  dans quelle mesure une bonne agitation favorise-t-elle la fermentation ?
- les éléments nutritifs :
  effet d'extrait de viande, de sulfate d'ammonium et de dihydrogénophosphate de potassium dans le substrat.
- les produits de conservation et désinfectants :
  on peut p.ex. étudier l'acide sorbique comme produit de conservation en ajoutant diverses quantités (100, 250, 500, 1000 et 2000 mg) de sorbate de potassium.

Remarques Afin d'obtenir des résultats comparables, il faut veiller aux points suivants :

- il faut toujours utiliser la même sorte de levure et elle doit être fraîche.
- il faut veiller à saisir, porter et reposer les fioles d'Erlenmeyer avec le moins de secousses possible sinon les résultats risquent d'être faussés.
- lorsqu'on travaille à différentes températures, il faut peser le plus rapidement possible, afin de limiter le refroidissement ou l'échauffement.

Mettler-Toledo International Inc.
CH-8606 Greifensee, Suisse
Tél. +41-44-944 22 11
Fax +41-44-944 30 60

Allemagne	**Mettler-Toledo GmbH,** D-35353 Giessen Tél. (0641) 50 70, Fax (0641) 507 128
Australie	**Mettler-Toledo Ltd.,** Port Melbourne, Victoria 3207 Tél. (03) 9644 57 00, Fax (03) 9645 39 35
Autriche	**Mettler-Toledo GmbH.,** A-1230 Wien Tél. (01) 604 19 80, Fax (01) 604 28 80
Belgique	**Mettler-Toledo s.a.,** B-1932 Zaventem Tél. (02) 334 02 11, Fax (02) 334 03 34
Brésil	**Mettler-Toledo Ltda.,** 06455-000 Barueri/São Paulo Tél. (11) 7295 1692, Fax (11) 421 3459
Canada	**Mettler-Toledo Inc.,** Ontario, Canada Tel (800) 638-8537, Fax (905) 681-8036
Chine	**Mettler-Toledo (Shanghai) Ltd.,** Shanghai 200233 Tél. (21) 6485 04 35, Fax (21) 6485 33 51
Corée	**Mettler-Toledo (Korea) Ltd.,** Seoul 137-130 Tél. 82-2-3498-3500, Fax 82-2-3498-3555
Croatie	**Mettler-Toledo, d.o.o.,** HR-10000 Zagreb Tél. 01 29 58 130, Fax 01 29 58 140
Danemark	**Mettler-Toledo A/S,** DK-2600 Glostrup Tél. (43) 270 800, Fax (43) 270 828
Espagne	**Mettler-Toledo S.A.E.,** E-08908 Barcelona Tél. (93) 223 76 00, Fax (93) 223 76 01
Etats-Unis	**Mettler-Toledo, Inc.,** Columbus, OH 43240 Tél. 800-METTLER, Fax (614) 438 4900
France	**Mettler-Toledo s.a.,** F-78222 Viroflay Tél. (01) 3097 17 17, Fax (01) 3097 16 16
Grande-Bretagne	**Mettler-Toledo Ltd.,** Leicester, LE4 1AW Tél. (0116) 235 70 70, Fax (0116) 236 5500
Hongrie	**Mettler-Toledo, KFT,** H-1139 Budapest Tél. (01) 288 40 40, Fax (01) 288 40 50
Hong Kong	**Mettler-Toledo (HK) Ltd.,** Kowloon Tél. (852) 2744 1221, Fax (852) 2744 6878
Indes	**Mettler-Toledo India Pvt Ltd,** Mumbai 400 072 Tél. (22) 2857 08 08, Fax (22) 2857 50 71
Italie	**Mettler-Toledo S.p.A.,** I-20026 Novate Milanese Tél. (02) 333 321, Fax (02) 356 29 73
Japon	**Mettler-Toledo K.K.,** Tokyo 102-0075 Tél. (3) 3222-7101, Fax (3) 3222-7115
Kasakhstan	**Mettler-Toledo Asie Centrale,** 480009 Almaty Tél. (07) 3272 980 834, Fax (07) 3272 980 835
Malaisie	**Mettler-Toledo (M) Sdn. Bhd.,** 40150 Selangor Tél. (603) 784 55 773, Fax (603) 784 58 773
Mexique	**Mettler-Toledo S.A. de C.V.,** México C.P. 06430 Tél. (55) 5547 5700, Fax (55) 5547 2128
Norvège	**Mettler-Toledo A/S,** N-1008 Oslo Tél. 22 30 44 90, Fax 22 32 70 02
Pays-Bas	**Mettler-Toledo B.V.,** NL-4004 JK Tiel Tél. (0344) 638 363, Fax (0344) 638 390
Pologne	**Mettler-Toledo, Sp. z o.o.,** PL-02-822 Warszawa Tél. (22) 545 06 80, Fax (22) 545 06 88
République Tchèque	**Mettler-Toledo, spol, s.r.o.,** CZ-100 00 Praha 10 Tél. 272 123 150, Fax 272 123 170
Russie	**Mettler-Toledo C.I.S. AG,** 10 1000 Moskau Tél. (095) 921 92 11, Fax (095) 921 78 68
Singapour	**Mettler-Toledo (S) Pte. Ltd.,** Singapore 139959 Tél. 65-6890 0011, Fax 65-6890 0012
Slovaquie	**Mettler-Toledo,** SK-82104 Bratislava Tél. (02) 434 27 496, Fax (02) 433 37 190
Slovénie	**Mettler-Toledo, d.o.o.,** SI-1236 Trzin Tél. (01) 530 8050, Fax (01) 562 1789
Suède	**Mettler-Toledo AB,** S-12008 Stockholm Tél. (08) 702 50 00, Fax (08) 642 45 62
Suisse	**Mettler-Toledo (Schweiz) GmbH,** CH-8606 Greifensee Tél. (044) 944 45 45, Fax (044) 944 45 10
Taïwan	**Mettler-Toledo Pac Rim AG,** Taipei Tél. (2) 2657 8898, Fax (2) 2657 0776
Thaïlande	**Mettler-Toledo (Thailand) Ltd.,** Bangkok 10320 Tél. 66-2-723 0300, Fax 66-2-719 6479
Pour les autres pays:	**Mettler-Toledo AG** PO Box VI-400, CH-8606 Greifensee Tél. +41-44-944 22 11, Fax +41-44-944 31 70

www.mt.com/education-line

Pour de plus amples informations

Imprimé en Suisse 11795684